

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: FÍSICA

ANGELO KUHN BORKOWSKI

ANÁLISE DE CURVAS DE RETENÇÃO E DE DISTRIBUIÇÃO DE POROS DE UM  
LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO SUBMETIDO AOS SISTEMAS DE  
PLANTIO CONVENCIONAL E DIRETO

PONTA GROSSA

2009

ANGELO KUHN BORKOWSKI

ANÁLISE DE CURVAS DE RETENÇÃO E DE DISTRIBUIÇÃO DE POROS DE UM  
LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO SUBMETIDO AOS SISTEMAS DE  
PLANTIO CONVENCIONAL E DIRETO

Dissertação apresentada para obtenção do  
título de mestre na Universidade Estadual de  
Ponta Grossa, Área de Física.

Orientador: Prof.Dr. Fábio Augusto Meira  
Cássaro.

PONTA GROSSA

2009

Ficha Catalográfica Elaborada pelo Setor de Processos Técnicos BICEN/UEPG

B734a Borkowski, Angelo Kuhn  
Análise de curvas de retenção e de distribuição de poros de um latossolo vermelho distrófico submetido aos sistemas de plantio convencional e direto. / Angelo Kuhn Borkowski. Ponta Grossa, 2009.  
89 f.  
Dissertação ( Mestrado em Ciências - Área de Concentração : Física ) - Universidade Estadual de Ponta Grossa.  
Orientador : Prof. Dr. Fábio Augusto Meira Cássaro

1. Estrutura do solo. 2. Compactação 3. Sistemas de manejo. 4. Curva de retenção de água. 5. Distribuição de poros.  
I. Cássaro, Fábio Augusto Meira. II. T

CDD : 631.4

## TERMO DE APROVAÇÃO

ANGELO KUHN BORKOWSKI

### “ANÁLISE DE CURVAS DE RETENÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE POROS DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO SUBMETIDO AOS SISTEMAS DE PLANTIO CONVENCIONAL E DIRETO”.

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Ciências - Física da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora.

Orientador:

  
Prof. Dr. Fábio Augusto Meira Cássaro  
Departamento de Física, UEPG/PR

  
Prof. Dr. Edson Campanhola Bortoluzzi  
Departamento de Agronomia, UPF/RS

  
Prof. Dr. Luiz Fernando Pires  
Departamento de Física, UEPG/PR

Ponta Grossa, 20 de agosto de 2009.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que me deu coragem e persistência durante toda a minha vida.

Aos meus pais, Edison e Matilde, e meus irmãos, Eduardo e Patrícia, pelo incentivo e compreensão durante a realização deste trabalho.

Ao meu tio, Ricardo Fetzer, a quem devo o meu muito obrigado pelos conhecimentos passados sobre agronomia, imprescindíveis para este trabalho.

Ao IAPAR de Ponta Grossa e ao Dr. Jadir A. Rosa, pelo auxílio neste trabalho de pesquisa.

Ao Prof. Dr. Luiz Fernando Pires, pelos conselhos muito importantes ao longo deste trabalho.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

E por fim ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Augusto Meira Cássaro, pela contribuição com seus conhecimentos e sugestões na orientação desta dissertação.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão desta pesquisa.

O sol é para todos...

mas a sombra é para quem merece.

(Hilário Kuhn)

## RESUMO

Para avaliar os impactos ambientais gerados pelos sistemas de plantio, é necessário avaliar as variações provocadas por eles na estrutura do solo. O espaço poroso é o melhor indicador da qualidade estrutural do solo, pois é responsável, dentre muitos fatores, por fenômenos de transporte de água e solutos em seu interior e retenção de água por ele. Sistemas de manejo empregados no solo tendem a modificar sua estrutura. Grosso modo, o convencional é caracterizado pelo revolvimento do solo e mistura dos restos da cultura anterior em suas camadas mais interiores. Já o direto tem por característica principal o não revolvimento do solo, e os restos da cultura anterior são deixados na superfície do solo para incorporação deste material. O objetivo deste trabalho foi o levantamento da curva de retenção de água (CR), a qual foi determinada utilizando potenciais de 10-30-40-60-80-100-300-500-1000-4000-8000 cm de H<sub>2</sub>O, estes dados quando interpolados através de uma função do tipo “spline cúbica” permite a construção de curvas de retenção mais detalhadas do que as curvas obtidas por métodos tradicionais, assim sendo, obter as curvas de distribuição de poros (CDP) de um classificado como Latossolo Vermelho Distrófico sob os sistemas de plantio direto e convencional, em profundidades de até 0-40 cm. Com base nessas CDPs e nas CRs comparar as modificações produzidas na estrutura deste solo devido a esses dois tipos de manejo. A fim de se obter mais informações a respeito do solo estudado, também foram realizadas medidas de análise textural do solo, determinação da densidade do solo e a determinação da macro, micro e da porosidade total do solo. Os resultados deste trabalho mostraram que o solo sob o sistema de plantio direto apresentou menores valores de densidade em comparação com o solo sob plantio convencional, valores médios, respectivamente, de 1,09 contra 1,20Mg/m<sup>3</sup>. No solo sob plantio convencional observou-se um aumento de 12% na densidade das camadas mais profundas (abaixo de 10 cm) em comparação com a camada superficial (0-10 cm). Esse é um indicativo de compactação do solo, o qual, em geral, é atribuído ao emprego mais intensivo de maquinário agrícola neste tipo de sistema de plantio. Já o solo sob plantio direto apresentou uma camada compactada em 10-20 cm, com densidade aproximadamente 8% maior que as camadas acima (0-10 cm) e abaixo (10-20 cm), a qual foi associada a resquícios de outros sistemas de plantio realizados previamente na área sob plantio direto. Os resultados também indicaram maiores valores da porosidade total e macroporosidade para o solo sob plantio direto. As curvas de retenção CRs e de distribuição de poros CDPs mostraram maior homogeneidade do solo sob plantio direto nas camadas em profundidade que quando comparado ao solo sob o plantio convencional. Com exceção da camada superficial (0-10 cm) do solo sob plantio convencional, as CDPs mostraram que a distribuição de tamanhos de poros do solo sob os plantios direto e convencional é trimodal com picos nas regiões de raios entre: 1 e 6µm; 9 e 25µm e 25 e 100µm. Para a camada superficial do solo sob plantio convencional, a CR e a CDP indicaram que o sistema de plantio convencional promove uma grande desestruturação do sistema poroso do solo, tornando-o menos capaz de reter a água em seu interior devido a um alargamento da distribuição de poros acima de 25µm (macroporos).

Palavras chave: estrutura do solo; compactação; sistemas de manejo; curva de retenção de água; distribuição de poros.

## ABSTRACT

To evaluate the environmental impacts generated by the tillage systems, it is necessary to evaluate the variations caused by them in the soil structure. The space porous is the best indicator of the soil structural quality, because it is responsible, among many factors, for transport phenomena of water and solutes in his interior and water retention. Tillage systems used in the soil tend to modify her structure. Thick way, the conventional tillage is characterized by the soil revolviment and mixture of the remains of the previous culture in their more interior layers. Already the no-tillage has for main characteristic the non revolviment of the soil, and the remains of the previous culture are left in the surface of the soil for incorporation of this material. The objective of this work was the survey of retention curve (RC), the which was determinate using the potential of 10,30,40,60,80,100,300,500,1000,4000,8000 cm de H<sub>2</sub>O, this dates when interpolates through of function of kind "spline cubic" allowed the construction of retention curves more detailed of that the curves obtained by traditional methods, so then, obtain of pores distribution curves (CDP) of a Red Dystrophic Latossoil under no-tillage and conventional tillage systems, in depths of until 0-40 cm. With base in those CDPs and in CRs to compare the modifications produced in the structure of this soil due to those two tillage types. Also, to study those modifications such complementally studies they were accomplished as: the analysis textural (mechanics) of the soil, the determination of his/her density and the determination of the macro, micro and total porosity of the soil. The results of this work showed that the soil under the system of no-tillage presented smaller density values in comparison with the soil under conventional tillage, values, respectively, of 1,09 against 1,20Mg/m<sup>3</sup> (on average). Also, in the soil under conventional tillage an increase of 12% was observed in the density of the deepest layers (below 10cm) in comparison with the superficial layer (up to 10cm). That is an indicative of compacting of the soil, which, in general, it is attributed to the most intensive job of agricultural machinery in this type of tillage system. Already the soil under no-tillage presented a compressed layer, between 10 and 20 cm, with density approximately 8% larger than the adjacent layers, which was associated to traces of other tillage systems previously accomplished in the area under no-tillage. The results also indicated larger values of the total porosity and macroporosity for the soil under no-tillage. The retention curves CRs and of pores distribution CDPs showed larger homogeneity of the soil under no-tillage when compared to the soil under the conventional tillage. Except for the superficial layer (0-10 cm) of the soil under conventional tillage, CDPs showed that the distribution of sizes of pores of the soil under the direct and conventional plantings is trimodal with picks in the areas of rays among: 1 and 6µm; 9 and 25µm and 25 and 100µm. For the superficial layer of the soil under conventional tillage, CR and CDP indicated that the system of conventional tillage promotes a great desestructuration of the porous system of the soil, turning it less capable of keeping the water in his interior due to an enlargement of the distribution of pores above 25µm (macroporous).

Keywords: soil structure; compacting; tillage systems; water retention curves., porous distribution.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1.1.1	Diagrama esquemático mostrando o processo de formação do solo (educar.sc.usp.br/ciências/recursos.html).....	4
FIGURA 1.2.1	Amostra de solo indicando suas frações, (REICHARDT; TIMM, 2004).....	5
FIGURA 1.4.1	Potencial de pressão, (REICHARDT; TIMM, 2004).....	10
FIGURA 1.5.1	Diagrama esquemático de uma mesa de tensão. (adaptado de Eijkelkamp, 2007).....	13
FIGURA 1.5.2	Representação esquemática de uma câmara de pressão de Richards. (LIBARDI, 1995).....	15
FIGURA 1.5.3	Curva de retenção (CR) para dois tipos de solos. (REICHARDT; TIMM, 2004).....	17
FIGURA 1.7.1	Figura de um tubo capilar, (REICHARDT; TIMM; 2004).....	21
FIGURA 1.8.1	Exemplo de um gráfico de S contra h e de dS/dh contra h, (KUTÍLEK <i>et.al</i> , 2006).....	25
FIGURA 2.1.1	Foto de satélite da área experimental. (GOOGLEARTH, 2008).....	26
FIGURA 2.2.1	Área de coleta de amostras.....	28
FIGURA 2.2.2	Fotos ilustrativas da forma de coleta de amostras em camadas subseqüentes.....	29
FIGURA 2.2.3	Amostras na mesa de tensão.....	30
FIGURA 2.2.4	Amostras na câmara de Richards.....	30
FIGURA 3.1.1	Densidade do solo em função da profundidade média para sistemas de plantio convencional (PC) e plantio direto (PD). As barras nos gráficos indicam os desvios em torno dos valores médios.....	36
FIGURA 3.1.2	Valores de porosidade total, determinados pelos métodos de umidade de saturação e $\alpha$ .....	40
FIGURA 3.2.1	Curvas de retenção (S) referentes às profundidades investigadas (plantio convencional).....	41
FIGURA 3.2.2	Curvas de retenção (S) referentes às profundidades investigadas (plantio direto).....	43
FIGURA 3.2.3	Curvas de retenção do solo na camada de 0-10 cm, para os dois sistemas de manejo.....	44
FIGURA 3.2.4	Curvas de retenção do solo na camada de 10-20 cm, para os dois sistemas de manejo.....	46
FIGURA 3.2.5	Curvas de retenção do solo na camada de 20-30 cm, para os dois sistemas de manejo.....	47

FIGURA 3.2.6	Curvas de retenção do solo na camada, 30-40 cm, para os dois sistemas de manejo.....	48
FIGURA 3.2.7	Curvas de retenção média para os dois sistemas de manejo.....	49
FIGURA 3.2.8	Saturação relativa (S) na capacidade de campo em 300 cm de água, para os dois sistemas de manejo e em profundidade.....	50
FIGURA 3.2.9	CDPs para o sistema de plantio convencional nas diferentes profundidades investigadas.....	51
FIGURA 3.2.10	CDPs para o sistema de plantio direto nas diferentes profundidades investigadas.....	52
FIGURA 3.2.11	CDPs da camada de 0-10 cm para os dois sistemas de manejo. A curva em rosa representa a diferença entre as CDPs dos dois manejos.....	53
FIGURA 3.2.12	Porcentagem de aparecimento das áreas nas regiões 1, 2 e 3 para os dois sistemas de manejo, na camada de 0-10 cm.....	54
FIGURA 3.2.13	CDPs da camada de 10-20 cm para os dois sistemas de manejo. A curva em rosa representa a diferença entre as CDPs dos dois manejos.....	55
FIGURA 3.2.14	Porcentagem de aparecimento das áreas nas regiões 1, 2 e 3 para os dois sistemas de manejo, na camada de 10-20 cm.....	56
FIGURA 3.2.15	CDPs da camada de 20-30 cm para os dois sistemas de manejo. A curva em rosa representa a diferença entre as CDPs dos dois manejos.....	57
FIGURA 3.2.16	Porcentagem de aparecimento das áreas nas regiões 1, 2 e 3 para os dois sistemas de manejo, na camada de 20-30 cm.....	58
FIGURA 3.2.17	CDPs da camada de 30-40 cm para os dois sistemas de manejo. A curva em rosa representa a diferença entre as CDPs dos dois manejos.....	59
FIGURA 3.2.18	Porcentagem de aparecimento das áreas nas regiões 1, 2 e 3 para os dois sistemas de manejo, na camada de 30-40 cm.....	60
FIGURA 3.2.19	CDPs das camadas de 0-10 e 10-20 cm do sistema de plantio convencional. A curva em verde representa a diferença entre essas CDPs.....	61
FIGURA 3.2.20	CDPs das camadas de 10-20 e 20-30 cm do sistema de plantio convencional. A curva em verde representa a diferença entre essas CDPs.....	61
FIGURA 3.2.21	Porcentagem de aparecimento de poros sob as áreas nas regiões 1, 2 e 3 para o sistema de plantio convencional em função da profundidade média.....	62
FIGURA 3.2.22	CDPs das camadas de 0-10 e 10-20 cm do sistema de plantio direto. A curva em verde representa a diferença entre essas CDPs.....	63
FIGURA 3.2.23	CDPs das camadas de 10-20 e 20-30 cm do sistema de plantio direto. A curva em verde representa a diferença entre essas CDPs.....	64
FIGURA 3.2.24	Porcentagem de aparecimento de poros sob as áreas nas regiões 1, 2 e 3 para o sistema de plantio direto em função da profundidade média.....	64
FIGURA 3.2.25	Macroporosidade determinada pelo calculo das CDPs para sistemas de plantio convencional (PC) e plantio direto (PD).....	65

FIGURA 3.2.26	Microporosidade determinada pelo calculo das CDPs para sistemas de plantio convencional (PC) e plantio direto (PD).....	67
FIGURA A.1	Curva de retenção de um solo. (LIBARDI, 2000).....	77
FIGURA A.2	Curva diferencial da curva de retenção do solo da figura (A.1). (LIBARDI, 2000).....	77

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1.1	Valores médios da análise granulométrica em profundidade para sistemas de plantio convencional (PC) e plantio direto (PD). O termo (s) indica o desvio padrão em torno dos valores médios.....	27
TABELA 3.1.1	Valores médios de densidade do solo ( $\bar{\rho}$ ); desvio padrão (s) e coeficiente de variação (CV) para sistemas de plantio convencional (PC) e plantio direto (PD). .....	35
TABELA 3.1.2	Valores de porosidade total (PT) e $\alpha$ ; macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) do solo sob (PC) e (PD). .....	39
TABELA 3.2.1	Características físicas fornecidas pelo IAPAR referentes as área de plantio.....	59

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO 1 – TEORIA.....</b>	<b>4</b>
1.1 O SOLO.....	4
1.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO.....	5
1.3 ESTRUTURA DO SOLO.....	7
1.4 O MOVIMENTO DA AGUA NO SOLO.....	8
1.5 A CURVA DE RETENÇÃO DE AGUA NO SOLO (CR).....	12
1.6 A CR EM TERMOS DA SATURAÇÃO RELATIVA S E O AJUSTE POR UMA FUNÇÃO DO TIPO SPLINE CUBICA.....	18
1.7 O SOLO COMO UM CONJUNTO DE TUBOS CAPILARES.....	21
1.8 A CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DE POROS (CDP).....	23
<b>CAPÍTULO 2 – MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>26</b>
2.1 A ÁREA EXPERIMENTAL.....	26
2.2 COLETA DE AMOSTRAS E LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE RETENÇÃO.....	28
2.3 POROSIDADE TOTAL, MACROPOROSIDADE, MICROPOROSIDADE E DENSIDADE DO SOLO.....	33
<b>CAPÍTULO 3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>35</b>
3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO SOB SISTEMAS DE PLANTIO DIRETO E CONVENCIONAL.....	35
3.2 CURVAS DE RETENÇÃO EM TERMOS DA ATURAÇÃO RELATIVA (S) E DE DISTRIBUIÇÃO DE POROS (CDP).....	41
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>69</b>
<b>SUGESTÃO DE TRABALHO FUTURO.....</b>	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXO A FUNÇÃO CAPACIDADE DE ÁGUA.....</b>	<b>77</b>

## INTRODUÇÃO

O estado do Paraná se caracteriza por uma intensa atividade agrícola. Dentre os vários sistemas de manejo utilizados, destacam-se o sistema de plantio convencional e o sistema de plantio direto.

O sistema de plantio convencional consiste basicamente no revolvimento do solo com incorporação ou não dos restos de cultivos anteriores no seu interior. Este sistema de manejo deixa o solo desprotegido durante as primeiras semanas após a semeadura e, portanto, suscetível a ações climáticas. (CARVALHO et al; 1999; OLIVEIRA et al; 2008).

O sistema de plantio direto é feito sem o revolvimento do solo, em cuja superfície são deixados restos de culturas, as quais são mantidas sobre a superfície do terreno. (MIYASAKA; MEDINA, 1981).

Uma vez que estes sistemas de manejo possuem metodologias de preparo bastante distintas, é de se esperar que as propriedades físicas bem como a estrutura do solo sob estes dois sistemas sejam também diferentes. Entretanto, ao se analisar estudos relacionados a sistemas de manejo, e a influência destes sobre as propriedades físicas do solo, verifica-se que existe uma diversidade de comportamentos do solo para um mesmo sistema de manejo. Isto significa que, as generalizações relacionadas ao comportamento e modificações na estrutura do solo, devido a sistemas de manejo devem ser aplicadas com muito cuidado e restrições.

As diferenças entre os sistemas de manejo em geral são maiores nas camadas mais próximas à superfície. (PAGLIAI et al; 1995; LIPIEC et al; 2006;). À medida que camadas mais profundas do solo são investigadas, estas diferenças tendem a se tornarem menores. (IAPAR, 1981).

Dentre as varias propriedades físicas do solo, e que são comumente investigadas, a densidade é uma propriedade que permite inferir a respeito da compactação do solo. Estudos comparando valores de densidade para sistemas de plantio convencional e direto mostram, por exemplo, que o sistema de plantio convencional pode apresentar menor densidade (solo menos compacto) (GÓMEZ et al; 1999; TORMENA et al; 2002; BESCANA et al; 2006; MORET et al; 2007;), iguais valores de densidade (ARSHAD et al; 1999; MARTINEZ et al; 2008) e maiores valores de densidade (solo mais compacto), (McGARRY et al; 2000; DA VEIGA et al; 2008).

O fenômeno da compactação se caracteriza por gerar modificações na estrutura do solo, alterando seu espaço poroso, modificando os teores de água disponíveis para as plantas e alterando o movimento, a retenção da água no interior do solo (ARAUJO et al; 2004). A compactação é caracterizada como superficial quando o aumento de densidade ocorre no horizonte cultivável e subsuperficial quando o aumento de densidade ocorre abaixo desse horizonte (JORAJURIA et al; 1997).

De acordo com Reichardt (1996), um solo considerado compacto apresenta menor porosidade e conseqüentemente menor umidade de saturação. O grau de compactação do solo de acordo com Pagliai et al (2004) pode ser medido pela porcentagem de macroporos em um determinado volume de solo, e dentre muitos fatores, a principal causa da compactação do solo é atribuída ao tráfego de máquinas agrícolas em sua superfície. (PAGLIAI et al; 2003; BOTTA et al; 2006; BOTTA et al; 2008;). Assim sendo, o solo sob o sistema de plantio convencional, em princípio, é o mais suscetível à compactação devido à fragilização de sua estrutura, ocasionada pelo revolvimento nele produzido. Já no solo sob o sistema de plantio direto, esse efeito ocorre em menor intensidade, e isso se deve à maior resistência da estrutura do solo. No entanto, efeitos cumulativos podem levar, ao longo dos anos, à aparição de camadas muito compactas próximas à superfície do solo sob o plantio direto (BORTOLUZZI et al; 2008).

A retenção de água pelo solo é uma propriedade bastante importante, pois se relaciona à estrutura do solo. A intensidade com que a água é retida na matriz do solo depende, dentre outros fatores, da porosidade e do sistema poroso do solo (BESCANA et al; 2006; LIPIEC et al; 2006). Assim, um aumento da densidade do solo, produz, em média, uma transformação dos poros de dimensões grandes (macroporos do solo) em poros de menores dimensões (microporos do solo) com conseqüente aumento na capacidade de retenção de água pelo solo (SILVA et al; 2006 a).

Os diferentes sistemas de plantio e o tráfego de maquinário agrícola sobre o solo, produzem modificações em seu espaço poroso (RICHARD et al; 2001). É de se esperar, portanto, que essas alterações modifiquem a intensidade com que água fica retida na matriz do solo. O levantamento das curvas de retenção (CR) fornece, então, uma importante ferramenta para se determinar modificações na estrutura do

solo, geradas por compactação ou descompactação nos diferentes sistemas de manejo empregados no solo.

Muito comumente as curvas de retenção (CRs) são ajustadas por métodos tradicionais usando a curva de Van-Genuchten (VAN-GENUCHTEN, 1980). Porém, outros trabalhos mais recentes propõem o ajuste das curvas de retenção em termos da saturação relativa  $S$  por um polinômio do tipo spline cúbico (KUTILEK, 2004; KUTILEK et al; 2006; LIPIEC et al; 2006; KASTANECK; NIELSEN, 2001 e KOSUGI; HOPMANS, 1998). Ao serem ajustadas dessa forma, um melhor ajuste das CRs é conseguido e, como consequência, informações mais precisas a respeito das modificações da estrutura do solo, devidas aos diferentes manejos, podem ser obtidas e comparadas

Em ambos os sistemas de plantio, convencional ou direto, a estrutura do solo é afetada em maior ou menor grau. Assim sendo, quantificar as modificações geradas pela adoção dos diferentes plantios é de grande importância.

O objetivo principal deste trabalho foi o de investigar as modificações na estrutura do solo (inferindo indiretamente através do levantamento da curva de retenção) gerado pelos sistemas de manejo direto e convencional em profundidades de 0-40 cm.

Para essa investigação destacam-se os seguintes estudos realizados:

- determinação das propriedades físicas do solo tais como: densidade; análise granulométrica; porosidade total, macro e microporosidade.
- levantamento de curvas de retenção de água (CRs) dos solos nestes sistemas de manejo.
- levantamento da curva de distribuição de poros (CDP) do solo dos dois sistemas de manejo a partir do uso da função “spline cúbica”.
- determinação das modificações na macro e microporosidade utilizando a curva de distribuição de poros.



## CAPÍTULO 1 - TEORIA

Neste capítulo serão abordados os aspectos teóricos referentes aos assuntos apresentados ao longo desta dissertação.

### 1.1 O SOLO

Em Física dos solos, o termo solo é referido como a camada externa e agriculturável da superfície terrestre. O solo é composto por uma mistura complexa de materiais orgânicos (carbono), inorgânicos (ferro, potássio, alumínio) e organismos vivos (fungos, moluscos e insetos), e tem como principal função fornecer apoio e suporte para as plantas que dele extraem água e nutrientes (WINTER, 1976).

O processo de formação do solo ocorre por ação de processos climáticos, físicos, químicos e biológicos, os quais no decorrer de eras geológicas transformaram lentamente, por processos de desintegração, decomposição e recomposição, a rocha matriz em solo. O solo apresenta camadas distintas, às quais dão-se o nome de horizontes. Um horizonte é qualquer camada que pode ser distinguida visual ou texturalmente de suas camadas vizinhas.

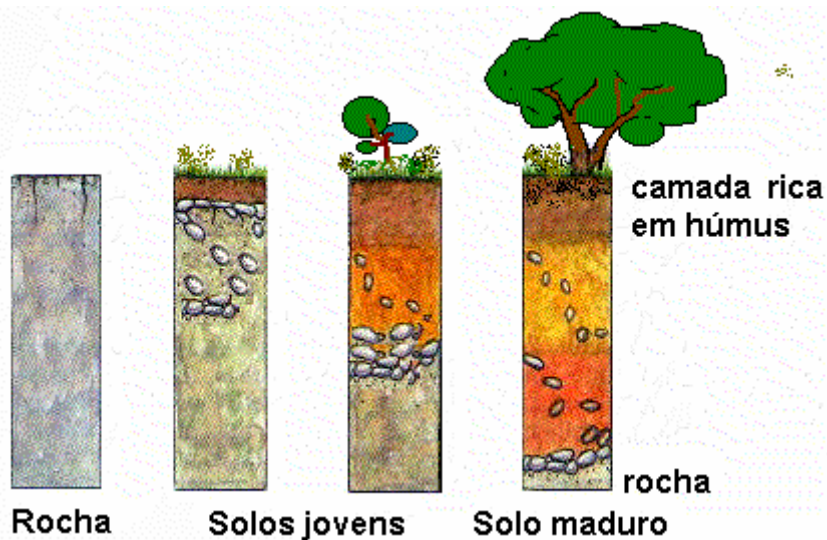


FIGURA 1.1.1: Diagrama esquemático mostrando o processo de formação do solo. ([educar.sc.usp.br/ciências/recursos.html](http://educar.sc.usp.br/ciências/recursos.html))

## 1.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

Para definirmos algumas propriedades físicas do solo, as quais foram utilizadas e investigadas neste trabalho, separa-se um determinado volume total de solo  $V_T$  (figura 1.2.1) composto pelas frações: sólida, líquida e gasosa.

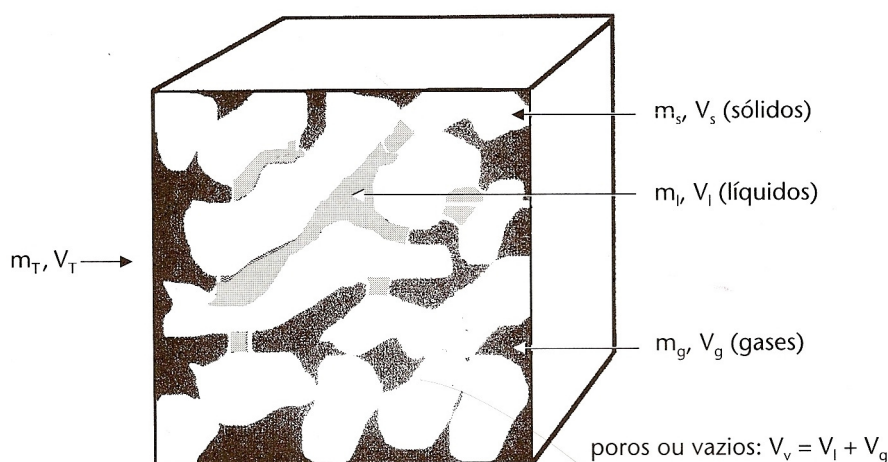


FIGURA 1. 2.1: Amostra de solo indicando suas frações, (REICHARDT; TIMM, 2004).

A fração sólida é, em geral, a que domina nesse determinado volume. É fundamental nos processos de condução e retenção de água pelo solo (JURY et al, 1991). Esta fração é composta basicamente por partículas de areia, silte e argila, as quais diferem entre si, quanto ao seu diâmetro médio.

As partículas de argila possuem granulação fina e o seu diâmetro médio é menor do que 0,002mm; as de silte possuem tamanhos entre 0,002 mm e 0,06 mm e as de areia possuem diâmetros entre 0,06 mm e 2 mm.

A fração líquida do solo constitui-se de uma solução de sais minerais e componentes orgânicos e preenche total ou parcialmente o sistema poroso do solo.

A fração gasosa é constituída de ar, com uma composição pouco alterada em relação ao ar atmosférico.

De acordo com o que é apresentado na figura 1, o volume total  $V_T$  do solo é dado pela soma dos volumes referentes a cada fração.

Assim sendo temos:

$$V_T = V_S + V_G + V_L \quad (1.2.1)$$

na qual:  $V_S$ ,  $V_G$  e  $V_L$  representam, respectivamente, os volumes das frações sólida, gasosa e líquida do solo.

De maneira análoga, dizemos que a massa total da amostra de solo  $M_T$ , contida no volume  $V_T$ , será dada por:

$$M_T = M_S + M_G + M_L \quad (1.2.2)$$

na qual:  $M_S$ ,  $M_G$  e  $M_L$  são, respectivamente, as massas das frações sólida, gasosa e líquida contidas no volume  $V_T$  do solo.

A porosidade total do solo “ $\alpha$ ” é um índice que indica a porcentagem do volume de solo que é ocupado por seus poros. Dessa forma, a porosidade do solo é definida como:

$$\alpha = \frac{V_T - V_S}{V_T} = \frac{V_L + V_G}{V_T} \quad (1.2.3)$$

Uma forma prática de se determinar esse índice consiste em verificar o volume de água que é introduzido no solo ao saturá-lo, ou seja, ao preenchê-lo totalmente por água.

A densidade do solo “ $\rho$ ” é definida como:

$$\rho = \frac{M_S}{V_T} (kg.m^{-3}) \quad (1.2.4)$$

Uma das formas mais comuns de determinação da densidade do solo, e é a que foi utilizada neste trabalho, é o método do anel volumétrico, que de forma sucinta se caracteriza por medir a massa seca da amostra ( $M_S$ ) e dividir pelo volume total do cilindro onde a amostra de solo foi colhida.

A umidade do solo quantifica a porcentagem de água presente em uma determinada amostra, por volume de solo. A umidade à base de volume é definida como:

$$\theta = \frac{V_L}{V_T} (m^3 \cdot m^{-3}) \quad (1.2.5)$$

A solução do solo muitas vezes é considerada próxima à água pura, cuja densidade  $\rho_L$  é igual a  $1 \text{ g/cm}^3$ .

### 1.3 ESTRUTURA DO SOLO

A estrutura do solo se deve ao arranjo das partículas de argila, silte e areia que o compõe. O arranjo destas partículas determina o espaço poroso do solo, o qual é responsável pelo armazenamento e retenção de água no solo. Essa propriedade de retenção é conhecida determinando-se do potencial matricial do solo.

Neste trabalho iremos usar a classificação de tamanhos de poros apresentada em Embrapa (1997). Nesta classificação, os poros do solo são divididos em duas classes de acordo com o seu diâmetro. Esses são denominados de macroporos (poros com raios característicos maiores ou iguais a  $25\mu\text{m}$ ) e microporos (poros com raios característicos menores que  $25\mu\text{m}$ ).

Segundo (PAGLIAI et al; 2003), poros com diâmetro entre  $0,5\mu\text{m}$  e  $50\mu\text{m}$  são classificados como “poros de armazenamento”, os quais funcionam como um reservatório de água para as plantas e microorganismos. Poros com diâmetros entre  $50\mu\text{m}$  e  $500\mu\text{m}$  são denominados como “poros de transmissão ou condução”.

A estrutura do solo é uma propriedade dinâmica e pode estar sujeita a modificações devido a processos naturais e a ações humanas (PIRES et al, 2008). Assim sendo, dentre muitos fatores modificadores, destacam-se: a ação de gotas de chuva, as quais devido a impactos promovem a compactação da camada mais superficial do solo, camada entre 0-5 cm (ROUSSEVA et al; 2002). Segundo (LACHINICHT et al; 1997; RILEY et al, 2008;), a atividade de minhocas no interior do solo, promove um aumento de poros de grandes dimensões, facilitando a drenagem de água. Ciclos de umedecimento e molhamento (HUSSEIN; 1998; PIRES et al, 2008), promovem modificações da estrutura do solo, podendo alterar significativamente suas propriedades, tais como a sua densidade.

A compactação do solo, gerada pelo tráfego e uso de maquinário agrícola nas modernas práticas de agricultura, é sempre levantada como uma das principais causas da modificação da estrutura do solo. Em geral, devido ao peso desse maquinário, a estrutura do solo se torna mais compacta, o que produz concomitantemente, aumento da densidade e redução da porosidade do solo. (PAGLIAI et al; 2003; BOTTA et al; 2006; BOTTA; et al; 2008;).

Segundo Botta et al. (2006); Pagliai et al. (2003), um solo compacto se caracteriza por apresentar modificações na estrutura do solo, como por exemplo, redução do espaço poroso, principalmente na região de macroporos e que por conseqüência promove alterações nas curvas de retenção do solo, influenciando também propriedades como a condutividade hidráulica e penetração de raízes.

Para Foloni et al (2003) o fenômeno da compactação, esta intimamente relacionado ao aumento de densidade do solo, e este influencia, por exemplo, a difusão de gases no interior do solo afetando o crescimento radicular.

#### 1.4 O MOVIMENTO DA ÁGUA NO SOLO

Através dos conceitos da Mecânica Clássica, a um corpo na superfície da Terra, associa-se basicamente, duas formas de energia: a cinética e potencial.

O movimento da água no sistema solo-planta-atmosfera, é geralmente muito lento. Sendo assim, a energia cinética associada a esse movimento é muito pequena e em muitos casos pode ser desprezada. (REICHARDT, 1996). Uma vez que a cinética é desprezada, o estado de energia da água no solo é associado praticamente à sua energia potencial, a qual é função de sua posição e condição interna, assim sendo, o seu movimento no interior do solo se da por diferenças de potenciais.

Para se determinar o estado de energia da água no solo, definimos um potencial total  $\psi_T$ , o qual é apresentado a seguir:

$$\psi_T = \int_{P_0}^{P_1} v dP + \int_{P_0}^{P_{AR}} \left( \frac{1}{\rho_{sol}} - v_{sol} \right) dP_{ar} + \int_{Z_0}^{Z_1} mg dZ + \int_{\theta_0}^{\theta_1} \omega(\theta) d\theta \quad (1.4.1)$$

Onde os termos da expressão anterior representam:

$v$ =volume específico da água;

$v_{sol}$ =volume específico da solução;

$\rho_{sol}$ =densidade da solução;

$P_{ar}$ =Pressão do ar;

$P$ =pressão à qual a água está submetida;

$m$ =massa da água;

$g$ =aceleração devida ao campo gravitacional no local onde a água se desloca ou se encontra;

$Z$ = posição, tomada em relação a um referencial arbitrário, no qual a água se encontra;

$\theta$ = a umidade do solo; e, finalmente;

$\omega(\theta)$  = é uma função que descreve a interação entre a água e a matriz do solo.

Ou de uma outra forma:

$$\psi_T = \psi_P + \psi_N + \psi_G + \psi_M \quad (1.4.2)$$

$\psi_P$  = Potencial de pressão

$\psi_N$  = Potencial pneumático

$\psi_G$  = Potencial gravitacional

$\psi_M$  = Potencial matricial

Os termos da equação (1.4.2), mais importantes para o estudo aqui realizado, são apresentados a seguir.

**Potencial de Pressão ( $\psi_P$ ):** o potencial de pressão ocorre no caso em que o solo encontra-se saturado, (LIBARDI, 1995).

Usando os conceitos da hidrostática, sabemos que a pressão em um ponto qualquer (por exemplo, o ponto B), o qual se encontra sob uma coluna de água de altura  $h$  figura (1.4.1), é dada por  $P = P_o + \rho gh$ .  $P_o$  é uma pressão de referência, em geral, considerada a atmosférica.

Em unidades do Sistema Internacional (SI) isso corresponde a:  $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$  (Joules por metro cúbico), ou seja, unidade de energia por unidade de volume. Dessa forma a energia por unidade de volume de água associada a essa situação é dada por:

$$\psi'_p = \rho gh . \quad (1.4.3)$$

O valor da energia  $\psi_p$  (potencial de pressão) de um volume específico de água  $v$ , situado sob uma coluna hidráulica de altura  $h$  é, portanto:

$$\psi_p = v \psi'_p = v \rho gh = vP , \quad (1.4.4)$$

proporcional à coluna de água acima deste.

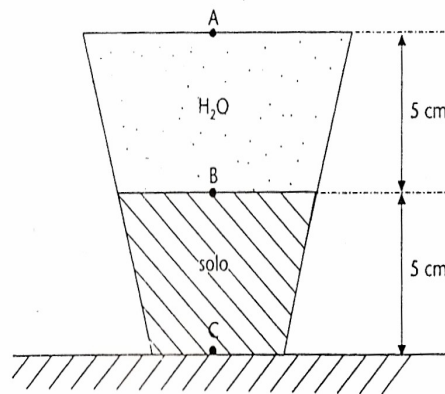


FIGURA 1.4.1: Potencial de pressão, (REICHARDT; TIMM, 2004).

A diferença entre os potenciais de pressão dos pontos A e B é dada pela seguinte expressão:

$$\psi_{PB} - \psi_{PA} = v(P_B - P_A) = \int_{P_A}^{P_B} v dP \quad (1.4.5)$$

Se tomarmos o ponto A como referência de pressão  $P_A = P_0 = 0$ , chegamos ao seguinte resultado:  $\psi_p(B) = vP_B$ , indicando que o potencial de pressão em B é maior que em A, e isso se deve à presença da carga hidráulica sobre o ponto B.

Outras maneiras de se expressar o potencial de pressão são: em termos de energia por massa ( $gh_B$ ) e energia por peso (ou carga hidráulica) ( $h_B$ ).

**Potencial Pneumático ( $\psi_N$ ):** o potencial pneumático surge, devido a uma diferença de pressão entre o ar presente no interior do solo, e a pressão no estado padrão (pressão atmosférica), surge assim, um componente de pressão pneumática que representa os efeitos das variações de pressão do ar sobre o potencial total a solução (LIBARDI, 1995).

O potencial pneumático assume diferentes valores, dependendo do estado de saturação e deformação do solo.

a) para sol saturado

$$\psi_N = 0 \quad (1.4.6)$$

b) para solo não saturado indeformável

$$\psi_N = \frac{1}{\rho_{sol}}(P_{ar} - P_0) \quad (1.4.7)$$

c) para solo não saturado deformável

$$\psi_N = \int_{P_0}^{P_{ar}} \left( \frac{1}{\rho_{sol}} - v_{sol} \right) dP_{ar} \quad (1.4.8)$$

**Potencial Gravitacional ( $\psi_G$ ):** o potencial gravitacional se deve ao campo gravitacional produzido pela Terra.

A componente da equação (1.4.1) correspondente ao potencial gravitacional é dada por:

$$\psi_G = \int_{z_0}^z mg dz \quad (1.4.9)$$

a qual fornece a seguinte expressão para o potencial gravitacional:

$$\psi_G = mg(z - z_0) \quad (1.4.10)$$

no solo,  $z$  representa uma profundidade qualquer e  $z_0$  é uma profundidade tomada como referência, em geral, a superfície do solo  $z_0=0$ .

Assim sendo, temos que:



$$\begin{aligned} \text{se } z > 0 & \quad \psi_G(z) > \psi_G(0); \\ \text{se } z < 0 & \quad \psi_G(z) < \psi_G(0); \\ \text{se } z = 0 & \quad \psi_G(z) = \psi_G(0) \end{aligned}$$

representando a diferença  $z-z_0$  por  $z$ , a equação (1.4.10) é reescrita como:

$$\psi_G = mgz \quad (1.4.11)$$

**Potencial Matricial** ( $\psi_M$ ): o potencial matricial aparece como o devido a uma soma de várias forças, de adsorção e capilares, envolvendo a água e a matriz do solo. Seu cálculo é feito através da expressão:

$$\psi_M = \int_{\theta_0}^{\theta_i} \omega(\theta) d\theta \quad (1.4.12)$$

Assim sendo, o potencial matricial é entendido como o potencial com o qual a água encontra-se retida na matriz do solo.

Para solos saturados, ou seja, todos os poros preenchidos por água ( $\theta_i = \theta_o$ ), o potencial matricial é nulo ( $\psi_M = 0$ ). À medida que o solo seca o potencial matricial se torna diferente de zero, e passa a ter importância no movimento e retenção da água no solo.

A aplicação de (1.4.12) é bastante complicada uma vez que depende do conhecimento de todas as forças de interação entre a água e a matriz do solo.

De maneira geral, o potencial matricial é determinado experimentalmente e será mais bem compreendido quando os conceitos relacionados à determinação de uma curva de retenção (CR) forem introduzidos e explorados.

## 1.5 A CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO (CR).

Como foi mencionado anteriormente, é extremamente difícil determinar o potencial matricial pela equação (1.4.12) devido à complexidade da função  $\omega(\theta)$ . Esta função teria que considerar todas as interações entre a água e a matriz do solo. O potencial matricial, no entanto, é determinado experimentalmente, e isto é feito através do levantamento da curva de retenção (CR) da água no solo.

Para o levantamento de uma CR, basicamente determina-se a umidade do solo ( $\theta$ ), que permanece em uma amostra de solo na situação em que  $\psi_M \neq 0$ .

A determinação da CR é feita, basicamente de duas maneiras, por métodos de campo ou métodos de laboratórios. Os métodos de campo são os que empregam: a sonda de nêutrons, tensiômetros e a gravimetria (KLUTE, 1986; LIBARDI, 1995; RICHARDT; TIMM, 2004).

Nos métodos de laboratório são utilizados os funis de Haines (HAINES, 1930), e a mesa de tensão e as câmaras de Richards (RICHARDS; FIREMAN, 1943).

A figura (1.5.1) ilustra os componentes que fazem parte de uma mesa de tensão.

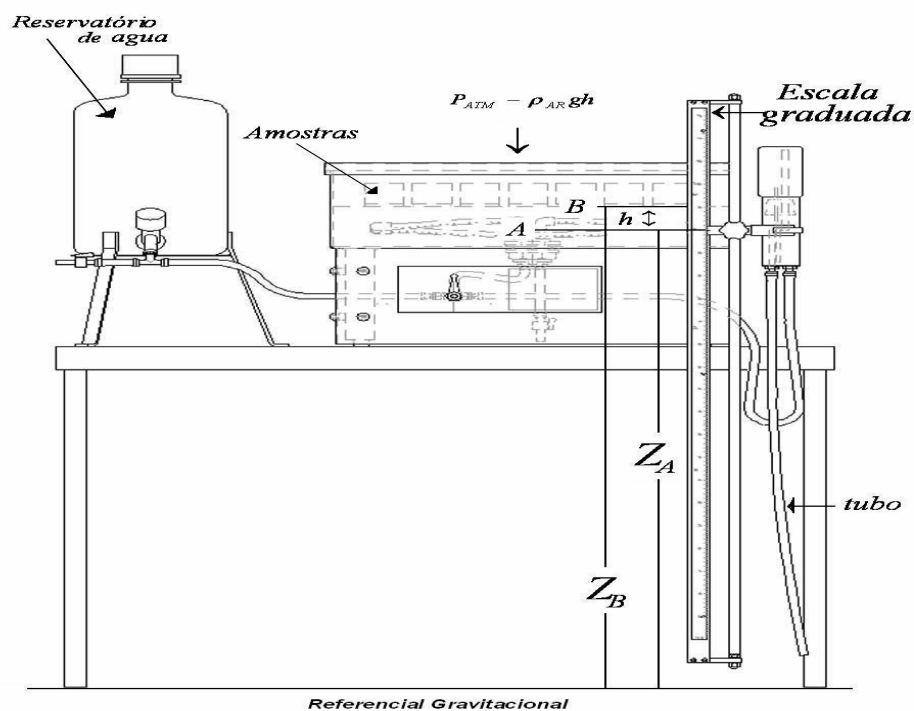


FIGURA 1.5.1: Diagrama esquemático de uma mesa de tensão (adaptado de EijKelkamp, 2007).

O procedimento para a medida de  $\psi_M$  por meio de uma mesa de tensão envolve a colocação de uma amostra saturada em contato hidráulico com camada de areia da mesa. Depois de realizado o contato hidráulico, abaixa-se a ponta do tubo produzindo-se uma diferença de nível  $h$  qualquer.

Devido a essa diferença de nível irá ocorrer uma drenagem da água presente na amostra de solo (gotejamento através do tubo de drenagem) até que a condição de equilíbrio seja alcançada, fim do gotejamento.

Na condição de equilíbrio, o potencial total ( $\psi_T$ ) a soma dos potenciais de pressão, pneumático, matricial e gravitacional ( $\psi_T = \psi_P + \psi_M + \psi_G + \psi_N$ ) no ponto A devem ser iguais ao potencial de um ponto B, localizado no interior da amostra, a qual não se encontra mais saturada.

Portanto, no equilíbrio  $\psi_T$  em A é igual a  $\psi_T$  em B.

$$\psi_T(A) = \psi_T(B) \quad (1.5.1)$$

Os potenciais totais dos pontos A e B são, respectivamente, dados pelas seguintes expressões:

$$\psi_T(A) = \nu P_o + \rho g z_A \quad (1.5.2)$$

e

$$\psi_T(B) = \nu(P_o - \rho_{AR}gh) + \psi_M + \rho g z_B \quad (1.5.3)$$

nas quais:

$P_o$  = pressão atmosférica

$\rho$  = densidade da solução

$\rho_{AR}$  = densidade do ar

$\psi_M$  = potencial matricial

$g$  = aceleração da gravidade

$Z_A$  = distância vertical do referencial gravitacional até o ponto A

$Z_B$  = distância vertical do referencial gravitacional até o ponto B

$h$  = desnível

Da igualdade entre as equações (1.5.2) e (1.5.3) obtém-se:

$$\psi_M = -\rho g(z_B - z_A) + \nu \rho_{AR}gh \quad (1.5.4)$$

de acordo com o que é apresentado na figura (1.5.2),  $z_B - z_A = h$ , desta forma:

$$\psi_M = -(\rho - v\rho_{AR})gh \cong -gh \quad (1.5.5)$$

uma vez que  $v\rho_{ar} \ll \rho$  ( $v=1\text{cm}^3/\text{g}$  e  $\rho_{ar}\cong 0$ ).

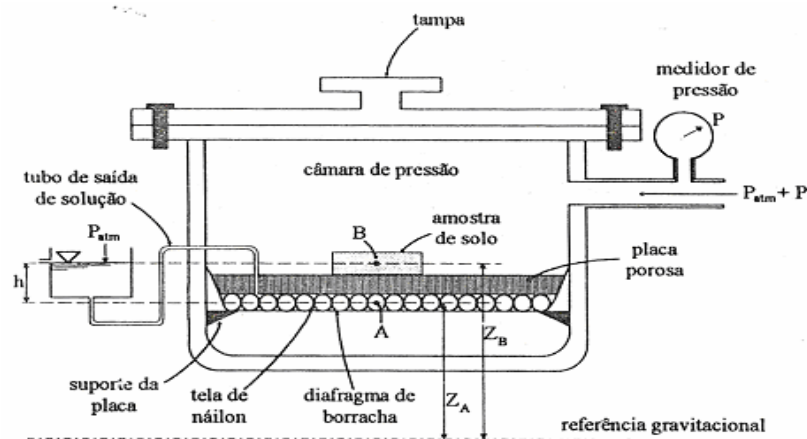
A equação (1.5.5) representa o potencial mátrico obtido em unidades de energia por volume de solução (REICHARDT; TIMM, 2004). Caso esta expressão seja dividida pela aceleração da gravidade, o resultado será expresso em unidades de carga hidráulica (m):

$$\psi_M = -h \quad (1.5.6)$$

Segundo o que é relatado em (LIBARDI, 1995), a sensibilidade deste método é maior para pequenos valores de pressão geralmente até 100 centímetros (1 metro) de água.

Para a determinação de uma curva de retenção em valores de pressão superiores a 100 centímetros de água utiliza-se o método da câmara de pressão de Richards.

A figura 1.5.2 ilustra esquematicamente uma Câmara de Richards.



*Câmara de pressão de Richards. Patm = pressão atmosférica*

FIGURA 1.5.2: Representação esquemática de uma câmara de pressão de Richards. (LIBARDI, 1995).

Inicialmente faz-se o contato hidráulico das amostras com uma placa porosa no interior da câmara.

Após esse contato, injeta-se ar no interior da câmara de maneira que a pressão interna aumente e a água da amostra mova-se para a placa porosa. Abaixo da placa, há um diafragma de borracha, o qual se conecta com o exterior da câmara por meio de um tubo de drenagem. Como este diafragma de borracha se encontra totalmente saturado, o excesso de água é expelido pelo tubo de saída em forma de gotas.

O equilíbrio é determinado pelo fim do gotejamento do tubo de saída, e varia dependendo: do tipo de solo, do volume das amostras de solo e do valor da pressão interna da câmara de Richards (KLUTE, 1986).

Novamente a condição de equilíbrio, tem-se que:

$$\psi_T(A) = \psi_T(B) \quad (1.5.7)$$

Uma vez que a amostra não se encontra mais saturada ( $\psi_M \neq 0$ ), o potencial total no ponto B é dado por:

$$\psi_T(B) = v(P_o + P) + \psi_M + \rho g z_B \quad (1.5.8)$$

e o potencial total no ponto A é dado por:

$$\psi_T(A) = vP_o + \rho g z_A \quad (1.5.9)$$

Da igualdade entre os potenciais totais tem-se que:

$$\psi_M = -vP - \rho g(z_B - z_A)$$

Na expressão anterior ( $z_B - z_A$ ) é aproximadamente a altura da amostra, que em geral é pequena e o termo  $\rho g(z_B - z_A)$  pode ser desprezado frente a  $vP=P$  (pois,  $v=1\text{cm}^3/\text{g}$ ).

Desta forma:

$$\psi_M = -P \quad (1.5.10)$$

Como é possível expressar essa pressão em termos de uma coluna equivalente de água, de altura ( $h$ ), tem-se que:

$$\psi_M = -h \quad (1.5.11)$$

É preciso ressaltar que na mesa de tensão há o esvaziamento da amostra devido a uma sucção aplicada em sua base, enquanto na câmara de Richards o esvaziamento se dá por um aumento da pressão ao redor das amostras. Porém, em ambos os casos, a ação da sucção ou pressão retira água da amostra, deixando-a em uma condição de umidade menor que a de saturação. Essa condição de umidade é a que é relacionada a uma determinada condição em que o potencial matricial da amostra é  $\Psi_M$ . O conjunto de dados  $\theta, |\psi_M|=h$ , representa a CR do solo.

Nos dois casos, o da mesa de tensão e da câmara de Richards,  $|\psi_M|=h$ , representa, em termos de uma coluna equivalente de água, o potencial matricial com que a água se encontra retida no interior da amostra de solo.

Exemplos de CRs são apresentados na figura (1.5.3). Nela são mostradas as CRs para dois tipos de solo, um classificado como arenoso e outro classificado como argiloso.

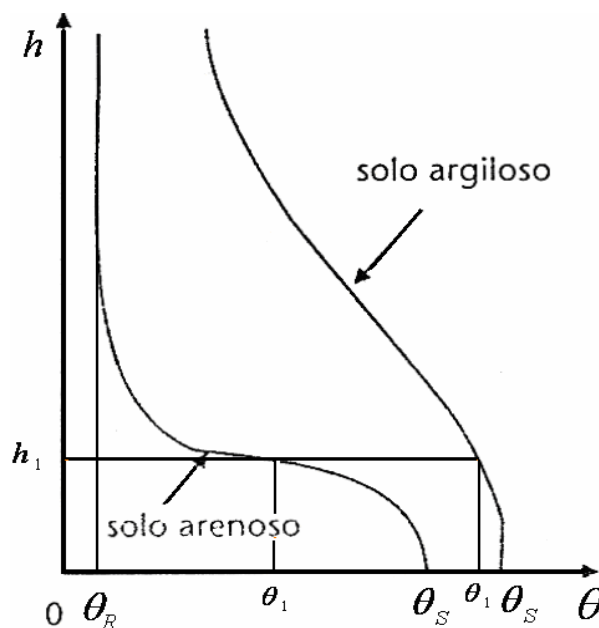


FIGURA 1.5.3: Curva de retenção (CR) para dois tipos de solos. (REICHARDT; TIMM, 2004).

Na figura 1.5.3  $\theta_s = \theta_o$  representa a umidade de saturação da amostra e  $h$  representa o valor absoluto do potencial matricial com que a água está retida no interior desta. O termo  $\theta_R$  é chamado de umidade residual e representa um valor limite, o qual é atingido para valores altos de  $h$ . O termo  $\theta_R$  é também denominado como o ponto de murcha permanente (WINTER, 1976), assim, quando a umidade do solo atinge este ponto a água do solo mais passara para as raízes das plantas. Para muitos solos este valor é atingido a um valor de  $|\psi_M| = h$  15000 cm de água.

De acordo com o que é visto na figura (1.5.3), verifica-se que para um determinado valor de  $h$  (representado por  $h_1$  na figura) a variação de umidade da amostra ( $\theta_1 - \theta_s$ ) é diferente para os dois tipos de solos. Observa-se que amostra de solo arenoso é a que sofre a maior variação de umidade devido a essa variação de  $h$  ( $\Delta h = h_1$ ). Isto mostra que solos arenosos são mais fáceis de serem secos em comparação aos argilosos.

## 1.6. A CR EM TERMOS DA SATURAÇÃO RELATIVA S E O AJUSTE POR UMA FUNÇÃO DO TIPO SPLINE CÚBICA

Trabalhos mais recentes como Lipiec et al., (2006); Kutilek (2004) propõem a construção de uma CR em termos da saturação relativa (S), cuja expressão é dada por:

$$S = \frac{(\theta - \theta_R)}{(\theta_s - \theta_R)} \quad (1.6.1)$$

na qual:

$\theta$  = umidade presente na amostra para um determinado valor de  $h$ .

$\theta_R$  = umidade residual.

$\theta_s$  = umidade de saturação.

O denominador da equação (1.6.1) representa a quantidade de água que é retirada da amostra de solo entre as condições em que ela se encontra saturada e com a umidade residual. Para  $\theta = \theta_s \Rightarrow S = 1$  e à medida que valores cada vez mais altos de  $h$  são investigados,  $\theta \rightarrow \theta_r \Rightarrow S \rightarrow 0$ .

Nesses trabalhos, a interpolação dos dados da CR é feita usando-se uma função do tipo "spline cúbico", a qual tem como principal característica proporcionar um ajuste mais detalhado da CR.

Uma função do tipo "spline cúbica", usada para a interpolação de  $n$  pontos  $(x_i, f(x_i))$ , nos quais  $x_i$  e  $f(x_i)$  representam, respectivamente, as variáveis independente e dependente no intervalo fechado  $[x_1, x_n]$ , com  $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ , é composta por uma coleção de  $(n-1)$  polinômios de terceiro grau  $P_i$ , cada qual utilizado para representar a função em um intervalo fechado  $[x_i, x_{i+1}]$ .

O polinômio em questão é dado por:

$$P(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \text{ com } i = 1, 2, \dots, (n-1) \quad (1.6.2)$$

A primeira e segunda derivadas desse polinômio são escritas, respectivamente, como:

$$P'(x) = b_i + 2c_i(x - x_i) + 3d_i(x - x_i)^2 \quad (1.6.3)$$

$$P''(x) = 2c_i + 6d_i(x - x_i) \quad (1.6.4)$$

A utilização de um ajuste do tipo "spline cúbico" com transição suave entre intervalos de interpolação  $[x_i, x_{i+1}]$  pressupõe que:

$$P_i(x_{i+1}) = P_{i+1}(x_{i+1}); P'_i(x_{i+1}) = P'_{i+1}(x_{i+1}) \text{ e } P''_i(x_{i+1}) = P''_{i+1}(x_{i+1}) \text{ com } i = 1, 2, \dots, (n-2) \quad (1.6.5)$$

Além disso:

$$P_i(x_i) = f(x_i) \text{ com } i = 1, 2, \dots, (n-1) \text{ e } P_{n-1}(x_n) = f(x_n). \quad (1.6.6)$$



Para a aplicação do método, ainda é assumido que:

$$P''_1(x_1) = P''_{n-1}(x_n) = 0. \quad (1.6.7)$$

Todas essas condições reunidas levam à resolução de um sistema linear para o encontro dos coeficientes  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  e  $d_i$  do polinômio de terceiro grau, procurado para a interpolação dos dados no intervalo  $[x_i, x_{i+1}]$ . A cada intervalo encontram-se um conjunto de coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$ , os quais determinam a curva que melhor se ajusta aos pontos obtidos experimentalmente. Essa sucessão de operações termina quando todos os conjuntos de pontos  $[x_i, x_{i+1}]$  pertencentes ao intervalo fechado  $[x_1, x_n]$  são interpolados, perfazendo um total de  $(n-1)$  polinômios encontrados.

Para finalizar, o “spline cúbico”, o qual nomeia o método, advém do fato de que polinômios do terceiro grau são utilizados no processo de interpolação dos pontos da CR. Também, no caso dessa curva,  $x$  representa  $h$  e  $f(x_i)$  representa  $S$ , a saturação relativa.

## 1.7. O SOLO COMO UM CONJUNTO DE TUBOS CAPILARES

Muitas vezes o espaço poroso do solo é modelado como se fosse um conjunto de tubos capilares de diferentes formas e tamanhos.

Considerando-se um tubo capilar figura (1.7.1):

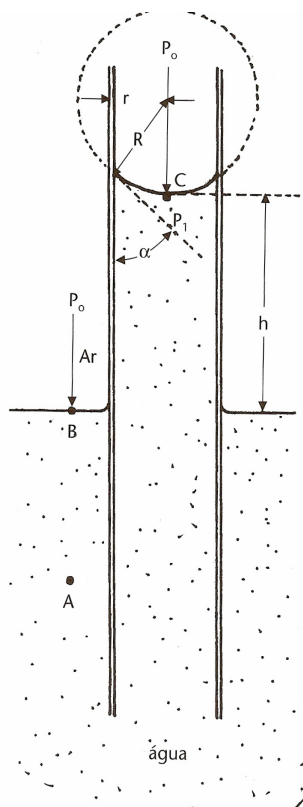


FIGURA 1.7.1: Figura de um tubo capilar, (REICHARDT; TIMM; 2004).

Na figura 1.7.1 é apresentado um tubo capilar inserido em uma superfície líquida, por exemplo, a água. Quando se insere esse tubo capilar nessa superfície ocorre a ascensão de uma coluna de água internamente a este tubo.

Nota-se que na interface líquido-ar do tubo existe um menisco cuja curvatura é  $\alpha$ . O valor do ângulo  $\alpha$  depende das forças de adsorção entre o líquido e as paredes do tubo. Para valores  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ , diz-se que o líquido molhou a superfície do tubo. Para  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$  diz-se que houve a rejeição do líquido pelas paredes do tubo, (REICHARDT; TIMM, 2004).

De acordo com a equação de Laplace (LIBARDI, 1995), a diferença entre a pressão interna do líquido  $P_1$  e a pressão atmosférica  $P_0$ , figura 1.7.1, é dada por:

$$\Delta P = P_1 - P_0 = \frac{2\sigma}{R} \quad (1.7.1)$$

O significado do termo  $2\sigma/R$  é força por unidade de área resultante na interface líquido-ar.

Da figura 1.7.1 temos que:

$$R = \frac{r}{\cos \alpha} \quad (1.7.2)$$

Portanto, substituindo-se (1.7.1) em (1.7.2), obtemos o seguinte resultado:

$$\Delta P = \frac{2\sigma \cos \alpha}{r} \quad (1.7.3)$$

Para o caso da água ( $\cos \alpha > 0$ ;  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ) e, de acordo com a 1.7.3, a diferença de pressão  $\Delta P$  é positiva, ou seja,  $P_1 > P_0$  (devido às forças de adsorção líquido-tubo). Isso faz com que uma coluna de líquido de altura  $h$  suba pelas paredes do tubo capilar até que o equilíbrio entre as pressões seja atingido.

Então:

$$\Delta P = \frac{2\sigma \cos \alpha}{r} = \rho gh \quad (1.7.4)$$

O termo  $\rho gh$  representa a diferença de pressão entre  $P_1$  e  $P_0$ , que segundo (LIBARDI, 1995) é denominada pressão efetiva (resultante) em um tubo capilar.

Isolando-se o termo  $h$  na equação (1.7.4), ficamos com o seguinte resultado:

$$h = \frac{2\sigma \cos \alpha}{\rho gr} \quad (1.7.5)$$

na qual:

$h$  = altura da coluna de água.

$\sigma$  = tensão superficial da água.

$\alpha$  = ângulo de contato entre a água e a parede do tubo.

$\rho$  = densidade da água.

$g$  = aceleração gravitacional local.

$r$  = raio do tubo capilar.

Assim sendo, o termo  $h$  representa a altura que uma coluna de água atinge em um tubo capilar. Para que ocorra o esvaziamento deste tubo capilar, uma pressão  $P$ , equivalente à altura da coluna  $h$ , deve ser aplicada no exterior do tubo, sobre a coluna de líquido.

Imaginando que o solo é uma composição de tubos capilares irregulares de diversos tamanhos,  $h = |\psi_M|$  representa essa pressão ou sucção, necessária para o esvaziamento deste conjunto de tubos. De acordo com a equação (1.7.5) poros de tamanhos maiores são esvaziados mais facilmente do que poros de tamanhos menores.

## 1.8 A CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DE POROS (CDP)

Como foi dito anteriormente, a CR em termos da saturação relativa ( $S$ ), consiste em relacionar o potencial matricial  $\psi_M$  com que a água está retida em uma amostra, representado em termos de  $h$ , à saturação relativa ( $S$ ) desta amostra.

Muito comumente em análises de curvas de distribuição de poros (CDP) o valor de  $h$  é substituído por um valor correspondente de raio de poro, através da equação (1.7.5).

Para entender o significado da CDP, define-se uma função densidade de probabilidade  $\rho(h)$ , para o raio de poro do solo conforme é descrito em Kosugi; Hopmans (1998), a qual é apresentada a seguir:

$$\rho(h) = \frac{dS}{dh} \quad (1.8.1)$$

Assim sendo, imaginemos que para um determinado potencial  $h_1$  o solo esteja em uma determinada umidade  $\theta_1$  e que para outro potencial  $h_2$  (com  $h_2 > h_1$ ) o solo encontre-se em uma umidade  $\theta_2$  (com  $\theta_2 < \theta_1$ ).

A variação da saturação relativa ( $\Delta S$ ) entre os dois potenciais ( $h_2$  e  $h_1$ ,  $h_2 > h_1$ ) é dada por:

$$\Delta S = S_2 - S_1 \quad (1.8.2)$$

Ou ainda:

$$\Delta S = \frac{\theta_2 - \theta_R}{\theta_S - \theta_R} - \frac{\theta_1 - \theta_R}{\theta_S - \theta_R} = \frac{1}{\theta_S - \theta_R} \Delta \theta \quad (1.8.3)$$

A variação da saturação relativa em função da variação de  $h$  é dada por:

$$\frac{\Delta S}{\Delta h} = \frac{1}{\theta_S - \theta_R} \frac{\Delta \theta}{\Delta h} \quad (1.8.4)$$

A equação (1.8.4) indica que  $\Delta S / \Delta h$  representa a fração  $\Delta \theta / (\theta_S - \theta_R)$  que é retirada da amostra devido a uma variação  $\Delta h$  imposta à ela.

Assim, como  $dS / dh$  representa  $\rho(h)$ , tem-se que:

$$\rho(h) = \lim_{\Delta h \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta h} = \frac{dS}{dh} = \frac{1}{\theta_S - \theta_R} \frac{d\theta}{dh} \quad (1.8.5)$$

Também,  $dS / dh$  representa o coeficiente angular da reta tangente à curva de  $S$  contra  $h$  (CR em termos de  $S$ ). Quanto maior for  $dS / dh$ , maior será  $\rho(h)$  e vice-versa. De acordo com (1.8.5), isso significa que, quanto maior o valor de  $\rho(h)$ , maior é o volume de água drenada do interior do solo para uma variação  $dh$  entre  $h$  e  $h + dh$ .

Então,  $\rho(h)$ , representa a variação de armazenamento de água do solo ( $d\theta$ ) para uma determinada variação de  $h$  ( $dh$ ) em função do armazenamento total de água do solo ( $\theta_s - \theta_r$ ).

Este método de análise é bastante semelhante ao que é feito para a determinação da função capacidade de água FCA do solo (LIBARDI, 2000). Detalhes sobre a FCA são encontrados no anexo A.

A figura mostra exemplos de curvas  $S$  e  $dS/dh$  contra  $h$  para dois solos distintos.

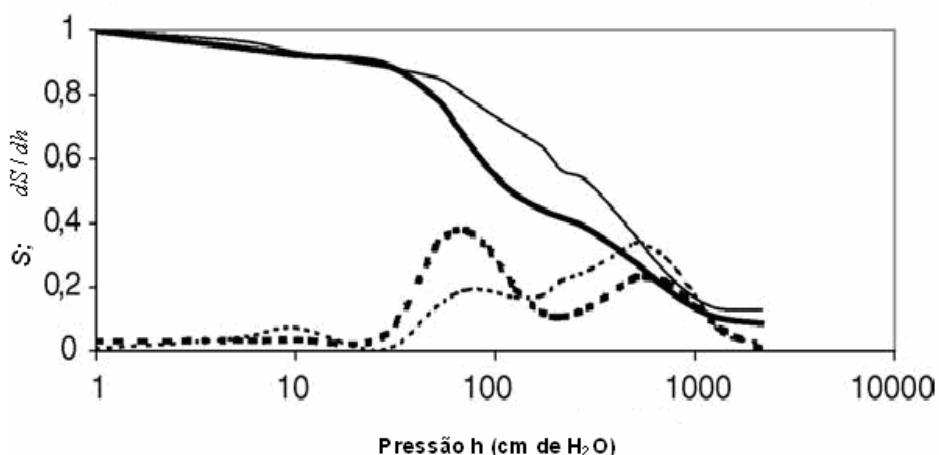


FIGURA 1.8.1: Exemplo de um gráfico de  $S$  contra  $h$  e de  $dS/dh$  contra  $h$ , (KUTÍLEK et al, 2006).

Na figura 1.8.1, constata-se que a curva  $S$  contra  $h$  possui dois pontos de inflexão. Pontos de inflexão estão diretamente relacionados com o aparecimento de picos na representação de  $\rho(h)$  contra  $h$ .

Segundo Kutilek et al (2006), a quantidade de picos que aparecem na curva diferencial, reflete diretamente a estruturação do solo. Solos mais estruturados possuem mais pontos de inflexão e conseqüentemente mais picos na representação  $\rho(h)$  contra  $h$ . Solos para os quais  $\rho(h)$  contra  $h$  apresentam apenas um pico são conhecidos como mono-modais; com dois picos, bi-modais; com três tri-modais e assim por diante.

## CAPITULO 2 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os aspectos referentes à área experimental e à realização dos experimentos.

### 2.1 A ÁREA EXPERIMENTAL

O estudo foi realizado na fazenda experimental do IAPAR (Instituto Agrônômico do Paraná) em Ponta Grossa, latitude 25° 06' S, longitude 50° 10' W, 875 metros acima do nível do mar. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cfb-subtropical úmido mesotérmico com verões frescos. A precipitação média anual é de aproximadamente de 1550 mm, com uma temperatura média anual máxima de 22°C e mínima de 18°C, com formação de geadas durante os meses mais frios.

Os estudos foram conduzidos em duas parcelas, situadas lado a lado, uma preparada sob sistema de plantio direto medindo aproximadamente 10.000m<sup>2</sup> (1 hectare), e outra sob sistema de plantio convencional, medindo aproximadamente 6.500m<sup>2</sup> (figura 2.1.1).



FIGURA: 2.1.1: Foto de satélite da área experimental (GOOGLEEARTH, 2008).

Os sistemas de manejo foram implementados na área da fazenda experimental há 28 anos. O sistema de plantio direto é conduzido ininterruptamente na área há 20 anos. Antes disso, nessa área houve alternância entre plantio

convencional e direto durante 8 anos. Nestas áreas adota-se a rotação de culturas, sendo que: no inverno, são utilizadas culturas de cobertura como aveia ou ervilhaca, e no verão, são cultivados milho ou soja, com alternância anual.

O solo é revolvido no sistema de plantio convencional durante os meses de abril (inverno) e outubro (verão), onde a profundidade de revolvimento fica entre 20 e 25 cm.

A passagem de maquinário agrícola durante uma cultura é feita da seguinte forma: a) no plantio convencional há uma passagem de arado e duas passagens de grade leve para o preparo do solo, mais duas passadas, uma para o plantio e outra para a colheita, eventualmente há uma ou mais passadas de maquinário visando tratamentos fitossanitários e b) no sistema de plantio direto há uma passada para o plantio e outra para a colheita, da mesma forma, se necessário há passagem de maquinário para tratamentos fitossanitários.

A tabela 2.1.1, apresenta os valores da análise granulométrica realizada pelo IAPAR, a qual foi feita utilizando o método da pipeta (EMBRAPA, 1997), estes valores refletem uma média das frações argila, silte e areia nas profundidades de 0-40 cm.

TABELA 2.1.1: Valores médios da análise granulométrica em profundidade para sistemas de plantio convencional (PC) e plantio direto (PD). O termo (s) indica o desvio padrão em torno dos valores médios.

<b>Sistema de manejo</b>	<b>Argila (%)</b>	<b>s</b>	<b>Silte (%)</b>	<b>s</b>	<b>Areia (%)</b>	<b>S</b>
PC	64,88	3,35	23,16	3,20	11,95	0,18
PD	65,43	4,11	23,21	3,69	11,36	0,44

De acordo com o Mapa de solos do Estado do Paraná, o solo dos dois sistemas de manejo investigados é caracterizado como um Latossolo Vermelho Distrófico úmbrico, textura argilosa, álico, fase campo subtropical, relevo suave ondulado (Mapa de solos do Estado do Paraná, 2008).



## 2.2 COLETA DE AMOSTRAS E LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE RETENÇÃO

A coleta de amostras para o levantamento de curvas de retenção foi feita no mês de Abril de 2008, cerca de 6 meses após o plantio e preparo do solo nos dois sistemas de manejo. A coleta se deu nas entrelinhas da cultura. Isso foi feito visando a minimização da interferência de raízes da cultura nas medições realizadas.

A coleta ocorreu em uma área de aproximadamente 1,5m<sup>2</sup> conforme é mostrado na figura (2.2.1).



FIGURA 2.2.1: Área de coleta de amostras.

As amostras foram coletadas em camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm, 5 por profundidade, o que fez um total de 20 por sistema de plantio. Foram utilizados cilindros de aço inox (cilindros de Uland) com dimensões de (4,8cm de diâmetro e 5,1 cm de altura).

A colocação dos cilindros ocorreu de forma alternada conforme apresentado na figura (2.2.2). Essa forma de coleta visou a não interferência pela própria coleta das amostras de uma camada superior na camada inferior.

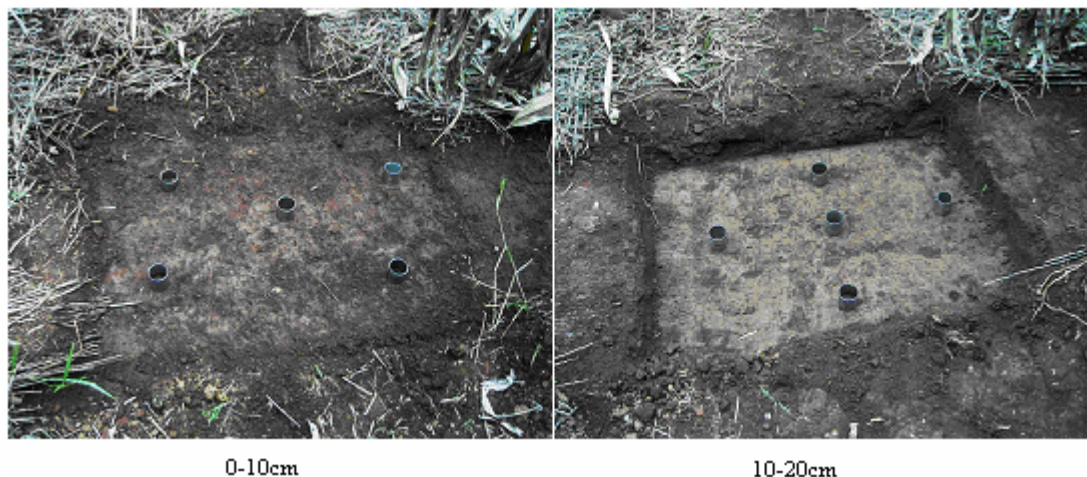


FIGURA 2.2.2: Fotos ilustrativas da forma de coleta de amostras em camadas subseqüentes.

Após a retirada, as amostras foram aparadas e acondicionadas de forma a que não houvesse perda de umidade e material delas.

Para o levantamento das curvas de retenção, a superfície inferior das amostras foi nivelada e coberta por uma tela do tipo “silk screen”. Isso evitou que houvesse perdas de solo nos processos de saturação e re-saturação das amostras durante o levantamento das CRs.

As amostras foram saturadas por meio da ascensão capilar. Para isso, coloca-se inicialmente uma pequena lâmina de água ao redor da base das amostras. Por capilaridade as amostras começam a ser molhadas. Após um período de 30 minutos aumentava-se a altura da lâmina de água e, isso era feito até que as amostras saturassem por completo. Este processo é feito de forma lenta, para que não ocorra o aprisionamento de bolhas no interior das amostras. (REICHARDT; TIMM, 2004; LIBARDI, 1995).

Os valores de potencial  $h$  investigados em uma mesa de tensão, Eijkelkamp, foram de: 10, 30, 40; 60 e 80 cm de água (figura 2.2.3).



FIGURA: 2.2.3: Amostras na mesa de tensão.

Nas câmaras de Richards da Soilmoisture, os valores potencial  $h$  investigados foram de 100, 300, 500, 1000, 4000 e 8000 cm de água (figura 2.2.4).



FIGURA 2.2.4: Amostras na câmara de Richards.

A escolha dos potenciais investigados neste trabalho teve como base o trabalho de (KUTILIEK et al., 2006), devido a este ter conduzido estudos semelhantes. Os potenciais investigados tiveram pequenas alterações com a inclusão de mais potenciais na região de macroporos e microporos. Cumpre ressaltar que neste trabalho o ultimo potencial investigado foi de 8000 cm de água, devido a limitações do equipamento experimental.

O processo de colocação dos cilindros na mesa de tensão requereu alguns cuidados. O primeiro foi o nivelamento da superfície da areia da mesa para que ocorresse um bom contato hidráulico entre as amostras e esta superfície. O

segundo, para melhorar ainda mais o contato hidráulico entre as amostras e a areia da mesa, foi à colocação de uma tela de nylon por cima da superfície da areia da mesa. O terceiro foi à observação da não existência de bolhas de ar entre as amostras, a tela de nylon e a superfície da areia da mesa.

Após esses cuidados, abaixou-se o tubo flexível da mesa até que um desnível  $h$  desejado fosse produzido. Atingido o equilíbrio para cada sucção aplicada, media-se a massa das amostras e estas eram colocadas novamente para saturar.

Para a utilização das câmaras de Richards, também alguns detalhes foram observados. O primeiro era a saturação das placas porosas do equipamento. Isso é feito imergindo-se as placas em água durante 48 horas. Após a saturação as placas eram colocadas na câmara e as amostras colocadas sobre um filme de água feito na superfície das placas. Desta forma procurou-se melhorar o contato hidráulico entre a placa e as amostras.

O processo de aumento da pressão interna da câmara era feito de forma lenta e gradual até que o valor de pressão desejado fosse atingido. Atingido o equilíbrio para cada sucção aplicada, também se media a massa das amostras e estas eram recolocadas para saturar.

O tempo de equilíbrio nas determinações na mesa de tensão foi em média de três dias e de 15 a 30 dias, dependendo do valor de pressão investigada, para a câmara de Richards.

Para a determinação da saturação relativa, equação (1.6.1) encontrou-se um valor médio da umidade das cinco amostras, referentes a cada camada investigada.

$\theta_s$ , como foi dito, representa a umidade de saturação média das amostras e  $\theta_r$  foi adotado como o valor de umidade das amostras no valor de  $h$  igual a 8000 cm de água.

Os dados de  $S$  contra  $h$  foram interpolados por uma função do tipo spline cúbica, utilizando-se o software TC2D (Table Curve 2D) da Systat Software (versão de demonstração).

A curva de distribuição de poros (CDP) foi obtida tomando-se o valor absoluto da primeira derivada das CR e optou-se pela sua representação em função do raio de poro utilizando-se a equação (1.7.5).

Nesta equação utilizaram-se:  $\sigma = 72,75 \times 10^3 \text{ N/m}$  para o valor da tensão superficial da água (líquido de molhamento), o valor de  $1000 \text{ kg/m}^3$  para a densidade da água, considerou-se  $\alpha \approx 0$  (KUTILEK et al, 2006) o valor da aceleração da gravidade igual a  $9,8 \text{ m/s}^2$ .

Com a adoção desses valores chegou-se á seguinte expressão para a relação entre  $r$  e  $h$ , respectivamente, o raio de poro e o valor de  $h$ :

$$r = \frac{1490}{h} \quad (2.2.1)$$

Na qual:

$h$  = potencial matricial investigado (dado em cm de água).

$r$  = raio de poro equivalente (  $\mu\text{m}$ ).

Para efeitos de comparação as GDPs obtidas foram normalizadas em termos de suas áreas. Isso foi feito considerando-se a seguinte transformação:

$$CDP_n = \frac{CDP}{\int CDP dr} \quad (2.2.2)$$

Adotando esta condição de normalização, a área sob a curva normalizada é sempre unitária, pois:

$$\int (CDP_n) dr = \int \frac{(CDP) dr}{\int (CDP) dr} = \frac{1}{\int (CDP) dr} \int (CDP) dr = 1 \quad (2.2.3)$$

## 2.3 POROSIDADE TOTAL, MACROPOROSIDADE, MICROPOROSIDADE E DENSIDADE DO SOLO.

Para a obtenção dos dados da porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo, foram utilizadas as amostras do levantamento das curvas de retenção.

A porosidade total do solo  $P_t$  foi determinada medindo-se a umidade de saturação das amostras, equação (2.3.1):

$$P_t = \left( \frac{M_{Sat} - M_s}{V_T} \right) \quad (2.3.1)$$

Na qual  $M_{Sat}$  é a massa do solo na condição de saturação;  $M_s$  é a massa do solo seco e  $V_T$  o volume da amostra.

Outro método alternativo para determinação da porosidade total encontrado em (LIBARDI, 1995) é:

$$\alpha = \left( 1 - \frac{\rho_s}{\rho_p} \right) \quad (2.3.2)$$

Onde os termos da equação (2.3.2) são:

$\alpha$  = porosidade total

$\rho_s$  = densidade do solo

$\rho_p$  = densidade de partículas

A densidade de partículas foi determinada através do método do balão volumétrico adaptado para picnômetros (EMBRAPA, 1997).

A microporosidade foi determinada, pelo conteúdo de água retida no solo para o valor de  $h$  igual a 60 cm de água (aproximadamente um raio de poro de 25 $\mu$ m) (EMBRAPA, 1997), fornecida pela equação 2.3.3:

$$Micro = \left( \frac{M_{60cm} - M_s}{V_T} \right) \quad (2.3.3)$$

Na qual  $M_{60cm}$  é a massa das amostras para  $h$  igual a 60 cm de água.

A macroporosidade do solo foi determinada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade do solo, usando-se a equação 2.3.4:

$$Macro = (P_t - Micro) \quad (2.3.4)$$

A densidade do solo foi determinada pela equação 1.2.4, considerando-se o volume das amostras com sendo o do cilindro em que elas foram colhidas.

Para a análise estatística dos dados recorreu-se aos cálculos de médias, desvios padrão e coeficientes de variação, (TRIOLA, 1999).

A média aritmética ( $\bar{X}$ ) é fornecida pela seguinte equação:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.3.4)$$

Na qual:

$\bar{X}$  : é a média de um conjunto de valores amostrais.

$x_i$  : é o valor da i-ésima observação.

$n$  : representa o número de valores de uma amostra.

O desvio padrão ( $s$ ) das medidas foi determinado utilizando-se a seguinte expressão:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2.3.5)$$

O coeficiente de variação ( $CV$ ) foi calculado pela expressão apresentada a seguir:

$$CV = \frac{s}{\bar{X}} \times 100 \quad (2.3.5)$$

## CAPITULO 3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos neste trabalho.

### 3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO SOB SISTEMAS DE PLANTIO DIRETO E CONVENCIONAL

Para caracterização das áreas estudadas determinou-se valores de densidade do solo. Estes valores são apresentados na tabela (3.1.1).

TABELA 3.1.1: Valores médios de densidade do solo ( $\bar{\rho}$ ); desvio padrão (s) e coeficiente de variação (CV) para sistemas de plantio convencional (PC) e plantio direto (PD).

Sistema de manejo	Profundidade (cm)	$\bar{\rho}$ (g/cm <sup>3</sup> )	s	CV (%)
PC	0-10	1,10	0,07	6,42
PC	10-20	1,23	0,02	1,6
PC	20-30	1,24	0,03	2,4
PC	30- 40	1,19	0,05	4,2
PD	0-10	1,04	0,08	7,5
PD	10-20	1,15	0,03	2,5
PD	20-30	1,08	0,03	2,7
PD	30-40	1,03	0,03	2,9

Os valores médios de densidade do solo fornecidos pela tabela (3.1.1), foram utilizados para construção do gráfico da figura (3.1.1) em função da profundidade média.



A Figura (3.1.1) apresenta os valores médios de densidade em função da profundidade média com os seus respectivos desvios padrões para os dois sistemas de manejo.

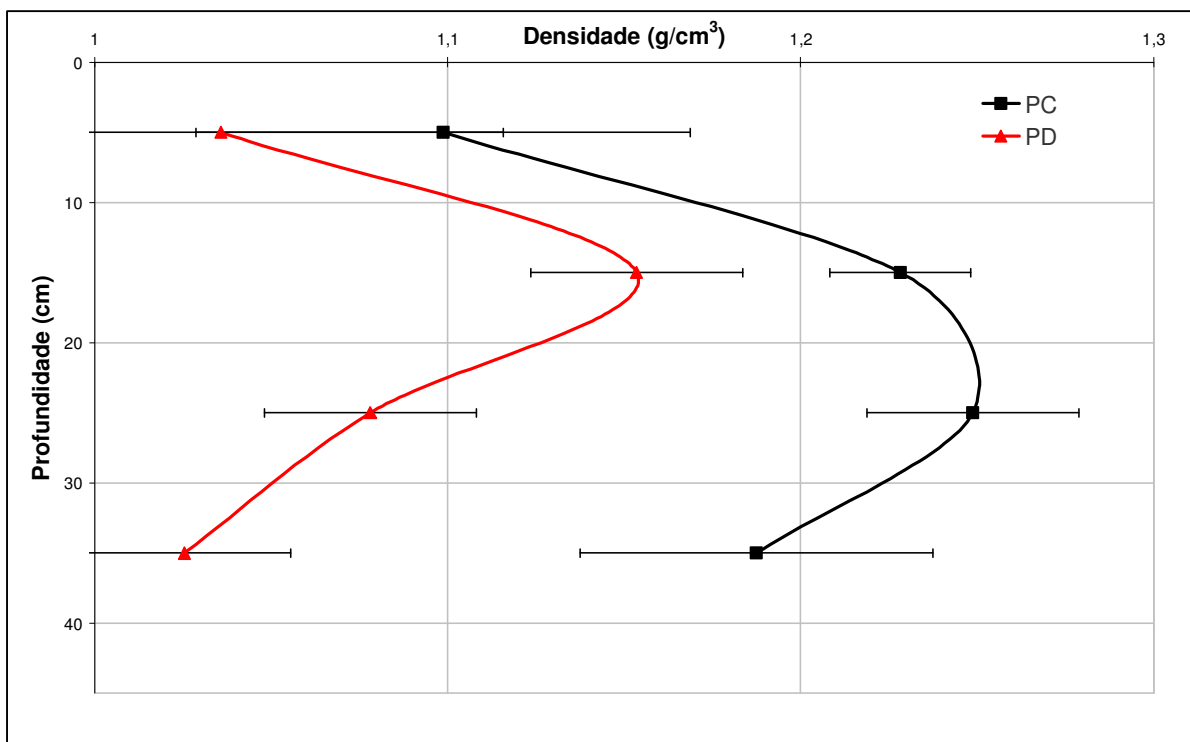


FIGURA 3.1.1: Densidade do solo em função da profundidade média para sistemas de plantio convencional (PC) e plantio direto (PD). As barras nos gráficos indicam os desvios em torno dos valores médios.

Os resultados apresentados na tabela (3.1.1) e figura (3.1.1) mostram que o valor da densidade da camada superficial do solo (0-10 cm) sob o sistema de plantio convencional é diferente dos valores de densidade das camadas inferiores (abaixo dos 10 cm). Particularmente, observa-se que a densidade dessa camada é 12% mais baixa do que a densidade das camadas inferiores. Uma tendência semelhante foi verificada em sistema de plantio direto na camada entre 10 e 20 cm. Qual seja: um aumento de cerca de 8% na densidade dessa camada em relação às camadas adjacentes (0-10 e 30-40 cm).

Resultados semelhantes foram encontrados por Argenton et al. (2005) comparando os efeitos dos sistemas de manejo em um Latossolo Vermelho Distroférico, classificado como muito argiloso. Nesse trabalho constatou-se que ambos os sistemas de manejo promoveram um aumento da densidade do solo em profundidade exceto para a camada de 30-40 cm para sistema de plantio direto.

Como mencionado no capítulo 1 seção 1.3 o fenômeno da compactação esta intimamente relacionado com o aumento da densidade do solo se caracteriza por gerar modificações na estrutura do solo reduzindo o seu espaço poroso, promovendo redução de poros de tamanho grandes e por conseqüente aumento de poros de tamanhos menores.

Segundo Botta et al. (2006), Botta et al. (2008) e Pagliai et al. (2003) a ação de máquinas pesadas na agricultura modifica fortemente a estrutura do solo, alterando as suas propriedades físicas. Devido ao constante revolvimento da camada superficial, os solos cultivados sob plantio convencional possuem uma estrutura mais fragilizada. Desta maneira o sistema de plantio convencional esta sujeito a uma forte compactação na camada arável, podendo sofrer uma grande deterioração na sua estrutura.

Segundo o que é descrito por (ARSHAD et al, 1999), o tempo de implementação dos sistemas de manejo influencia nos valores da densidade do solo. O autor relata que o solo sob sistema de plantio direto, em comparação ao convencional, pode: apresentar maiores valores da densidade do solo nos primeiros dois anos de implementação dos sistemas; que os valores de densidade do solo tornam-se similares com quatro anos de implementação dos sistemas; e pode diminuir em relação ao sistema de plantio convencional, a partir dos quatro anos de implementação. Isso explica de certa forma o que foi observado aqui, uma vez que o sistema de plantio direto está implementado na área há 20 anos e o convencional há 28 anos.

Já o aparecimento da camada mais densa entre as profundidades de 10 a 20 cm no solo sob o plantio direto, pode estar relacionado à alternância entre os sistemas de plantio convencional e direto, conduzidos previamente na área do plantio convencional, entre 1981 e 1988, portanto, há 20 anos, (CAVALIERI et al. , 2009). Também, (KEMPER; VIEIRA, 1979) citados por (IAPAR; 1981), analisaram cinco unidades de solo do Estado do Paraná e verificaram que solos cultivados em sistemas de plantio direto podiam apresentar camadas superficiais (0-20 cm) mais densas. (SILVA et al. ,2009 b.), ao investigar as variações das propriedades físicas de solos brasileiros do tipo Latossolo Vermelho Distrófico, em parcelas de plantio direto por 2 por 4, por 6 anos, em profundidades de 0-30 cm, verificou um aumento da densidade do solo em profundidade nesse tipo de plantio.

É interessante salientar que informações bastante distintas podem ser encontradas na literatura a esse respeito. Há resultados que mostram que o sistema de plantio direto, em comparação com o sistema de plantio convencional: apresenta maiores valores de densidade, (DAM et al.,2005; LIPIEC et al. ,2006; CAVALIERI et al. ,2009 e DARAGHMEH et al. ,2009) valores menores de densidade Kushwaha et al (2001); e valores de densidade que não apresentam diferenças significativas entre si (ISMAIL et al, 1994 e LOGSDON; CAMBARDELLA, 2000).

O fato do solo sob o plantio direto apresentar valores menores de densidade quando comparados aos apresentados pelo solo sob o convencional, pode ser consequência da maior atividade biológica que ocorre no solo sob o plantio direto, criação de bioporos (TEBRUGGE; DURING, 1999). Ainda, a resistência à passagem de máquinas agrícolas é maior no solo sob o plantio direto, o que reduz nesse tipo de plantio os fenômenos de compactação (TEBRUGGE; DURING, 1999).

DAM et al (2005), relatam que em sistemas de plantio de longo termo, no caso relatado por eles 28 anos, a manutenção de resíduos na superfície do solo leva a uma diminuição da densidade do solo como um todo. Porém, esses autores indicam que a densidade do solo é uma propriedade variável espacial e temporalmente, e que a comparação entre essa propriedade nos diferentes tipos de sistemas de manejo pode levar a diferentes conclusões de ano para ano e de local para local.

GLAB e KULIG (2008), a despeito do que é amplamente relatado, de que o sistema de plantio direto leva a uma maior compactação do solo quando em comparação ao convencional, encontraram valores de densidade do solo semelhantes entre si para os solos da camada superficial (0-10 cm) nestes sistemas de plantio direto. Relacionaram esse fato à cobertura com os restos de colheitas e à atividade biológica do plantio direto, segundo eles, os fatores que reduziram a densidade do solo nessa camada.

Na literatura, no entanto, os autores salientam que esse tipo de estudo depende, dentre outros fatores: do tipo de solo no qual os experimentos são conduzidos, o tempo de implementação dos sistemas de manejo, os tipos de cultura e a rotação entre culturas conduzidas nos sistemas de plantio, o tipo e frequência com que maquinários agrícolas são utilizados nas áreas, a ação mais ou menos pronunciada de organismos biológicos nas áreas, fatores climáticos, ciclos de

umedecimento e secamento do solo, o tempo entre a implementação de uma cultura e a coleta das amostras e etc.

Outro fato a ser destacado é que o coeficiente de variação (CV) associado às determinações das densidades na camada de 0-10 cm, para ambos os sistemas de manejo, foram os maiores. Isso indica que a camada superficial (0-10 cm) apresenta maior variabilidade dessas medidas em relação às camadas mais profundas. Ou seja, trata-se de uma camada de solo menos homogênea quando comparada às mais profundas. Isso pode ser explicado pelo fato de que a camada superficial, em princípio, é a que mais estaria sujeita aos processos naturais (chuvas, desenvolvimento de raízes, atividades biológicas e etc) e humanos (cultivo, revolvimento do solo, movimentação de maquinário agrícola e etc) desenvolvidos nos dois sistemas de manejo.

Através do levantamento das curvas de retenção, foi possível estimar valores da porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo sob os plantios direto e convencional. Esses valores são apresentados na tabela 3.1.2.

TABELA 3.1.2: Valores de porosidade total (PT) e  $\alpha$ ; macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) do solo sob (PC) e (PD).

<b>Sistema de manejo</b>	<b>Profundidade (cm)</b>	<b>PT (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>Macro (g/cm<sup>3</sup>) (&gt;25<math>\mu</math>m)</b>	<b>Micro (g/cm<sup>3</sup>) (&lt;25<math>\mu</math>m)</b>
PC	0-10	0,56	0,57	0,11	0,45
PC	10-20	0,52	0,53	0,06	0,46
PC	20-30	0,52	0,57	0,06	0,46
PC	30-40	0,54	0,58	0,06	0,47
PD	0-10	0,61	0,55	0,09	0,52
PD	10-20	0,55	0,49	0,09	0,47
PD	20-30	0,58	0,5	0,09	0,50
PD	30-40	0,58	0,52	0,09	0,51

Os resultados obtidos mostram que os efeitos de compactação são visíveis nos dois sistemas de plantio, principalmente abaixo da camada superficial (abaixo de 0-10 cm). Isso se deve à menor porosidade total dos solos abaixo dessa camada,

um reflexo dos maiores valores de densidade observados para essas camadas de solo.

Os valores de macroporosidade para o sistema de plantio convencional, apresentaram uma diminuição abaixo da camada superficial (0-10 cm). Constata-se que a camada de 0-10 cm apresenta uma macroporosidade que em média, é cerca de 80% maior que a mesma propriedade nos solos das camadas inferiores.

Os valores de microporosidade mostraram-se pouco variáveis em profundidade, no entanto constata-se que o sistema de plantio direto é o que apresenta os maiores valores desta propriedade.

O gráfico da figura (3.1.2) apresenta os valores de porosidade total da tabela (3.1.2), utilizando os dois métodos apresentados para a determinação da porosidade total.

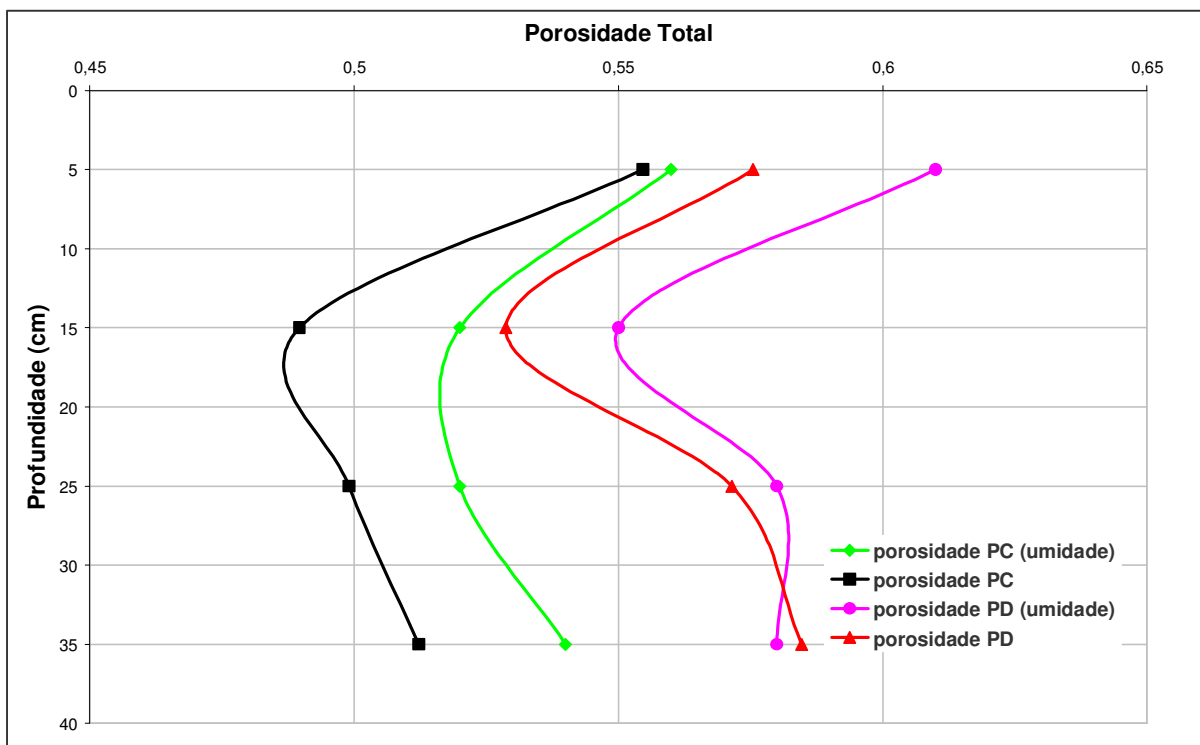


FIGURA 3.1.2: Valores de porosidade total, determinados pelos métodos de umidade de saturação e  $\alpha$ .

A diferença média entre os métodos de determinação da porosidade total figura (3.1.2) para o sistema de plantio convencional é em torno de 4%, enquanto que para o sistema de plantio direto é em torno de 3,5%.

A utilização de métodos diferentes de determinação de porosidade total, não alterou o padrão das curvas ao longo das camadas em profundidade, ou seja, a camada superficial (0-10 cm) se caracterizou por uma alta porosidade total em ambos os sistemas de manejo, enquanto que a camada de 10-20 cm apresentou os menores valores de porosidade total que se relacionam com os dados de densidade do solo da tabela (3.1.1) evidenciando o fenômeno da compactação. Abaixo da camada de 10-20 cm ambos os sistemas de manejo obtiveram, um aumento da porosidade total.

### 3.2 CURVAS DE RETENÇÃO EM TERMOS DA SATURAÇÃO RELATIVA (S) E DE DISTRIBUIÇÃO DE POROS (CDP).

Nesta seção, são apresentadas as curvas de retenção em termos da saturação relativa (S) e as curvas de distribuição de poros para os dois sistemas de manejo. A Figura 3.2.1 apresenta as curvas de retenção em termos da saturação relativa, para todas as profundidades investigadas, para o sistema de plantio convencional.

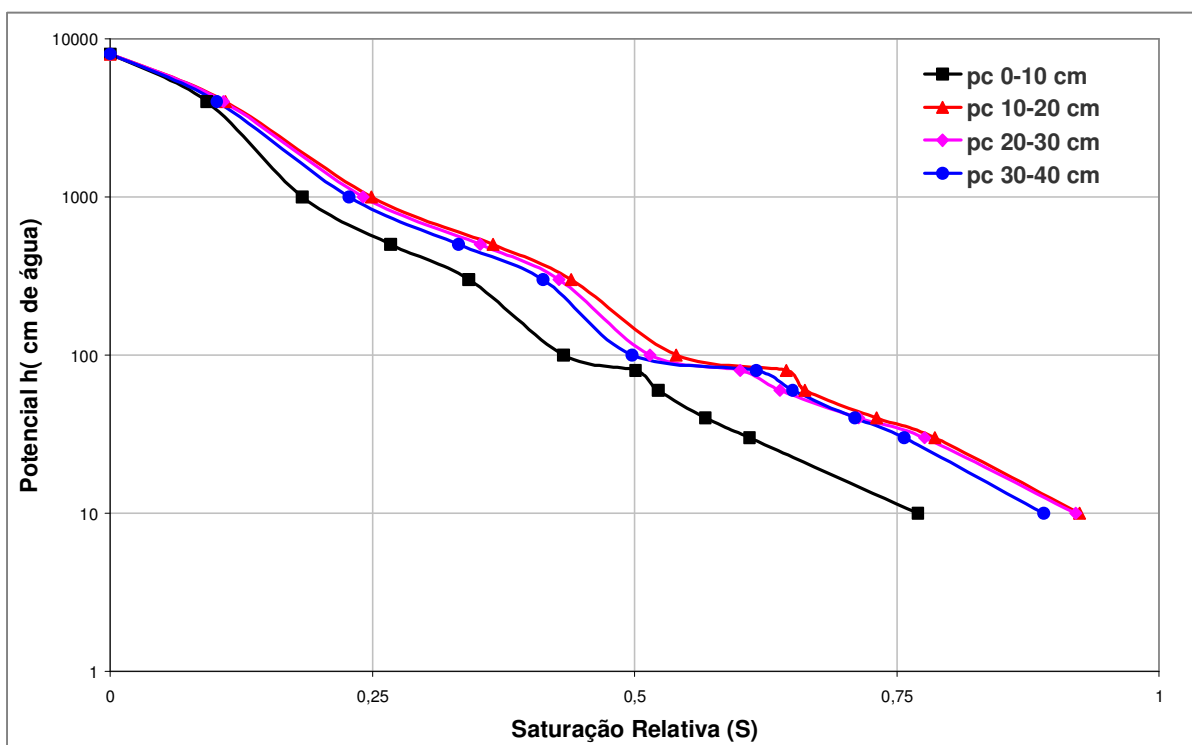


FIGURA 3.2.1: Curvas de retenção (S) referentes às profundidades investigadas (plantio convencional).

As curvas de retenção para sistema de plantio convencional apresentaram um comportamento diferenciado em profundidade. Particularmente, percebe-se que a camada de 0-10 cm apresenta-se bastante destacada em relação às camadas mais profundas.

Ainda em relação a essa camada, pode-se dizer que o solo desta camada é o menos capaz de reter água em seu interior. Essa afirmação é verificada percebendo-se que o valor da variação da saturação relativa  $\Delta S = S(h) - 1$ , para qualquer valor do potencial  $h$ , é, em módulo, a maior dentre todas as camadas investigadas. Isso indica que para esse potencial, a variação de umidade do solo, desde a saturação  $\theta_s = \theta(0)$  até o valor  $\theta = \theta(h)$  ( $\Delta\theta = \theta - \theta_s$ ) dessa camada, para a variação de potencial ( $\Delta h = h$ ), é a maior, em módulo, dentre todas as camadas investigadas. Isso ocorre, como foi mencionado, desde pequenos valores de  $h$  (solo próximo à saturação) quanto para altos valores de  $h$  (solo próximo à umidade residual).

Seguindo esse raciocínio, verifica-se que o solo da camada de 10-20 cm é o que retém mais fortemente a água em seu interior. Assim como os solos das camadas de 20-30 e de 30-40 cm são os que se mostram mais parecidos na forma como retém a água em seu interior.

Relacionando o comportamento das CRs com os resultados obtidos para a densidade e porosidade total do solo, respectivamente, apresentados nas tabelas 3.1.1 e 3.1.2, percebe-se uma concordância entre os resultados obtidos. O solo da camada de 0-10 cm se destacou dos solos das demais camadas por apresentar menor densidade e maior porosidade total. De acordo com a equação (1.7.5) o potencial com que a água é retida no solo varia com o inverso do raio médio do poro de um determinado capilar. Assim sendo, quanto maior a porcentagem de poros de tamanhos grandes na matriz do solo, maior sua macroporosidade, e menor é a sua capacidade de reter água em seu interior.

Os gráficos da figura 3.2.2 apresentam as curvas de retenção em termos da saturação relativa (S) para o solo sob o sistema de plantio direto.

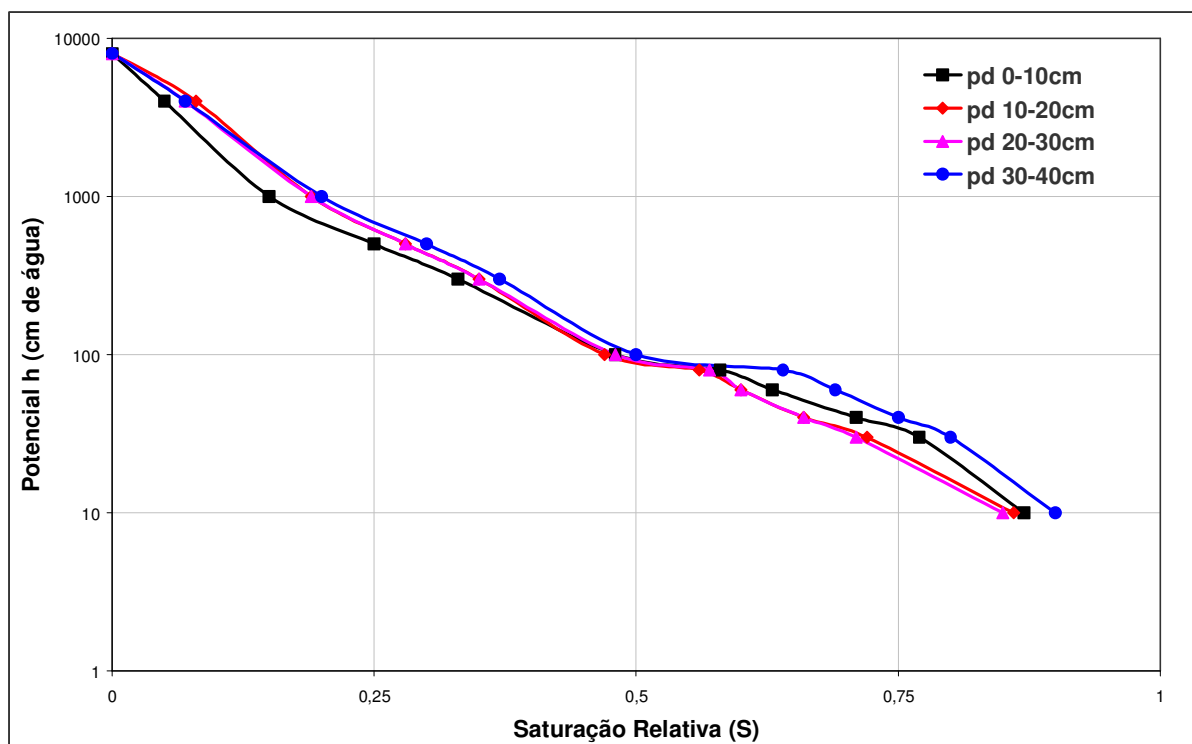


FIGURA 3.2.2: Curvas de retenção (S) referentes às profundidades investigadas (plantio direto).

As CRs das camadas do solo sob o sistema de plantio direto, no geral mostraram-se mais parecidas em profundidade quando comparadas ao solo sob o plantio convencional. Isto indica uma maior homogeneidade do solo sob o plantio direto. Para o solo desse plantio, os resultados de densidade e de porosidade se mostraram também menos variáveis.

Provavelmente isso pode estar relacionado ao menor revolvimento pelo qual o solo do plantio direto passa durante o seu manejo, quando comparado ao solo sob plantio convencional. Especialmente, as camadas mais superficiais do solo sob plantio convencional são as que mais estão sujeitas a modificações devido a este tipo de manejo.



Os gráficos da figura (3.2.3) apresentam as CRs dos solos da camada superficial (0-10 cm) dos dois sistemas de plantio investigados.

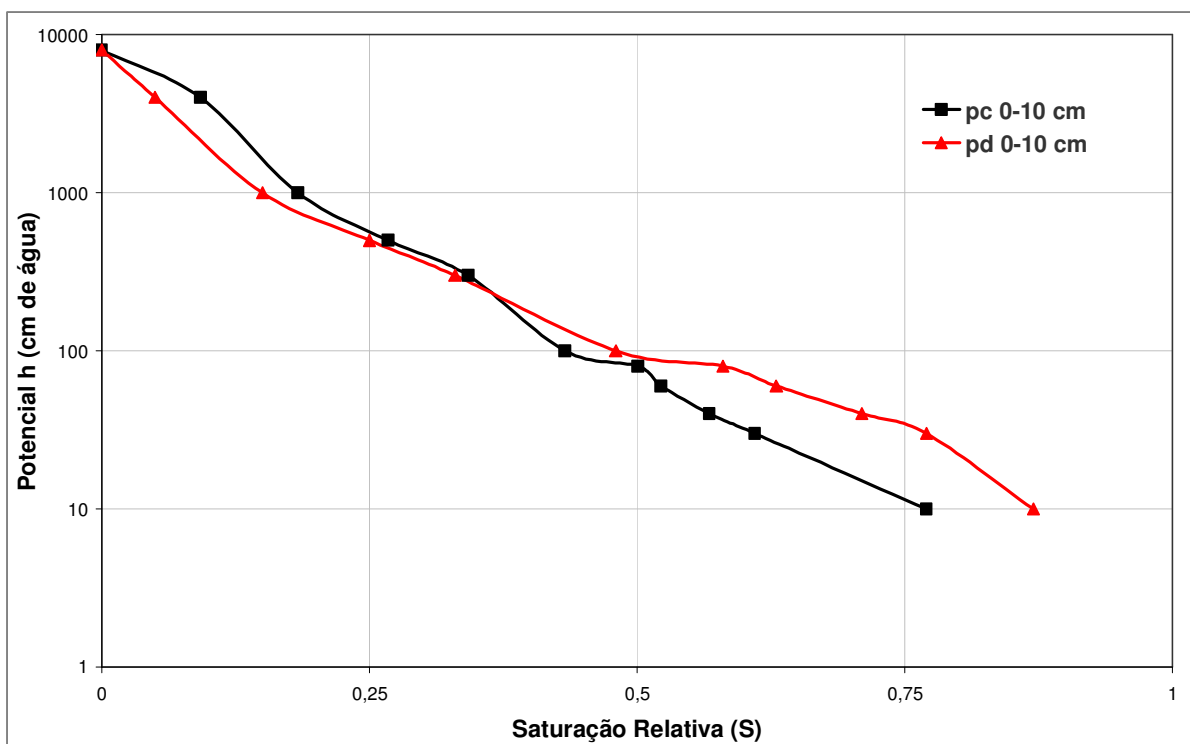


FIGURA 3.2.3. Curvas de retenção do solo na camada, 0-10 cm, para os dois sistemas de manejo.

Com base nos gráficos da figura (3.2.3), nota-se que o sistema de plantio convencional retém menos fortemente a água na camada de 0-10 cm que o sistema de plantio direto até um potencial  $h$  em torno de 500 cm de água (poros de raios até  $3\mu\text{m}$ , equação 1.7.5).

Os valores de macroporosidade, menor para o solo sob plantio direto de  $0,09 \text{ g/cm}^3$  (PD) contra  $0,11 \text{ g/cm}^3$  (PC), e microporosidade, maior para o solo sob o plantio direto de  $0,52 \text{ g/cm}^3$  (PD) contra  $0,45 \text{ g/cm}^3$  (PC), apresentados na tabela (3.1.2), sugerem que essas diferenças seriam esperadas. Isto é, o solo sob plantio convencional, por apresentar maior macroporosidade (quantidade maior de macroporos), é mais fácil de drenar quando comparado ao solo sob plantio direto. Para potenciais mais altos que 500 cm de água ( $\approx 3\mu\text{m}$ ), os comportamentos das curvas de retenção se assemelham. Se forem observados valores de potencial até 60 cm de água (poros com raios de até  $25\mu\text{m}$ ) vê-se que a maior microporosidade do solo sob plantio direto de  $0,52 \text{ g/cm}^3$  (PD) contra  $0,47 \text{ g/cm}^3$  (PC) afetou sobremaneira as CRs obtidas. Nesse caso, o solo sob PD retém mais fortemente a

água em seu interior sendo observada uma menor variação de armazenamento para esse solo em comparação ao solo sob plantio convencional.

Com respeito ao comportamento do solo superficial do sistema de plantio convencional, é sabido que as operações de preparo, em geral diminuem a densidade do solo e aumentam sua macroporosidade por deixar o solo mais solto (afogado) (DA VEIGA et al., 2008). Esses fatos foram aqui observados uma vez que os valores apresentados por essas propriedades foram, respectivamente, 1,10 g/cm<sup>3</sup>, na camada superficial (0-10 cm), e um valor em torno de 1,24 g/cm<sup>3</sup> nas camadas subjacentes (abaixo de 10 cm), e 0,11 g/cm<sup>3</sup> no sistema de plantio convencional contra 0,09 g/cm<sup>3</sup> no direto.

Os autores ressaltam que essas diferenças são acentuadas logo após os primeiros procedimentos de preparo (por exemplo, passagem de discos) e são amainadas após os segundos procedimentos (por exemplo, gradagem). Segundo eles a intensidade das modificações depende do tipo de solo, do tipo de manejo e do conteúdo de água no solo no momento dos procedimentos. Finalizam por dizer que essas modificações não são permanentes e tendem a ser revertidas ao longo do tempo e se devem à reconsolidação do solo por: ciclos de umedecimento e secamento, fatores climáticos como chuvas e tráfego de maquinário agrícola na superfície do solo (AHUJA et al, 2006) e (DA VEIGA et al, 2008).

Portanto, espera-se que o solo sob sistema plantio convencional apresente, até se reconsolidar completamente, características que o tornam menos capaz de reter a água em seu interior. Isso se deve principalmente ao fato de que esse solo de certa forma teve sua estrutura alterada de maneira a exibir uma quantidade maior de poros de maiores dimensões, os quais, em média são mais fáceis de serem esvaziados. O resultado disso na CR se reflete na maior facilidade de se extrair água dos espaços porosos do solo sob o PC, tal como o observado aqui.

O gráfico da figura (3.2.4) apresenta as CRs dos solos da camada de 10-20 cm, dos dois sistemas de manejo investigados.

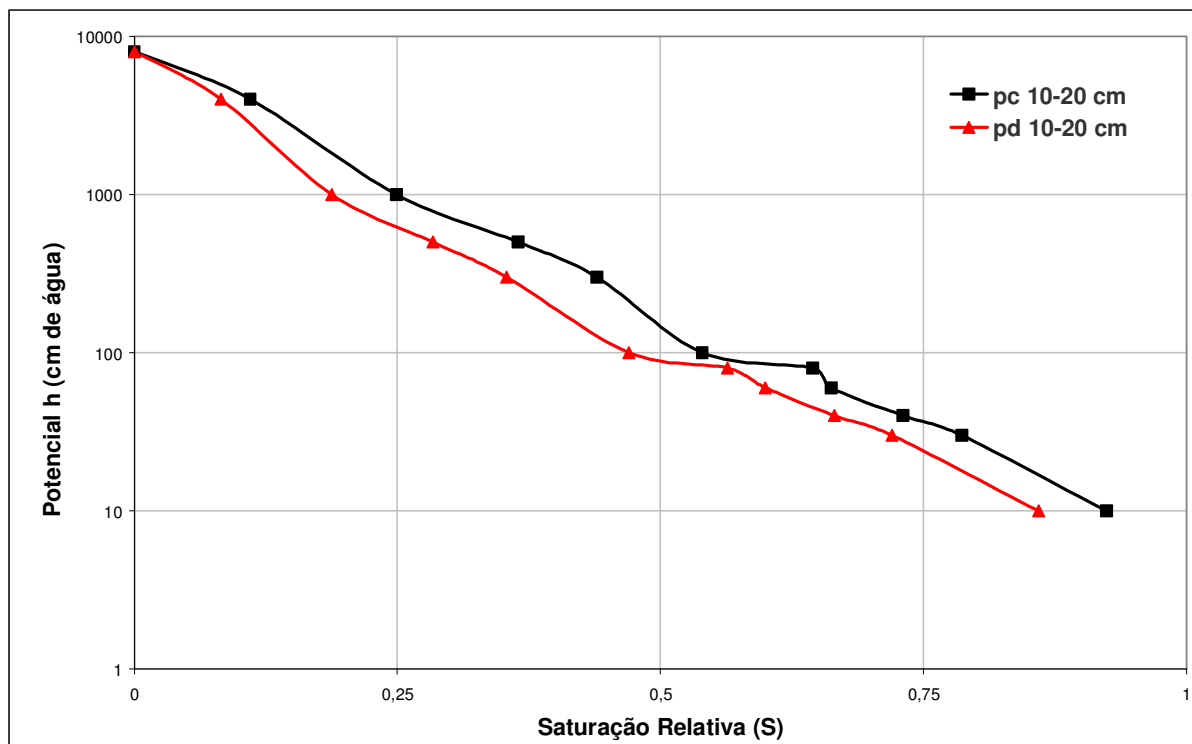


FIGURA 3.2.4. Curvas de retenção do solo da camada de 10-20 cm, para os dois sistemas de manejo.

Comparando-se os gráficos das figuras (3.2.3) e (3.2.4) percebe-se uma inversão no comportamento apresentado pelos solos dos diferentes manejos. Percebe-se que agora é mais fácil secar o solo sob o sistema de plantio direto que o solo sob o sistema de plantio convencional. Esse comportamento, de certa forma, seria esperado, uma vez que a macroporosidade do solo sob plantio convencional é menor do que a do solo sob plantio direto de  $0,06 \text{ g/cm}^3$  (PC) contra  $0,09 \text{ g/cm}^3$  (PD).

Desta forma, devido à presença em média de poros de maiores dimensões, no caso do solo sob o plantio direto, se torna mais fácil secá-lo. A diminuição da macroporosidade do solo sob o plantio convencional pode estar associada com o maior manejo empregado nesse tipo de sistema de plantio quando comparado ao sistema de plantio direto. Assim sendo, um solo com uma maior compactação se caracteriza principalmente por reter mais fortemente a água em seu interior.

As modificações que ocorrem nos gráficos da figura (3.2.4) são bastante semelhantes ao que é descrito em Kutilek et al. (2006), nesse trabalho é

apresentado o que ocorre tipicamente com a curva de retenção de um solo submetido a compressões pela passagem de implementos agrícolas em sua superfície. É mostrado que devido à compactação promovida no solo pelos implementos, há uma diminuição do número de macroporos, com conseqüente aumento da quantidade de microporos do solo, o que faz com que, em média, se aumente a capacidade retenção da água por este solo.

Os gráficos da figura (3.2.5) apresentam as CRs dos solos sob os dois sistemas de manejo, PC e PD, para a camada de 20-30 cm.

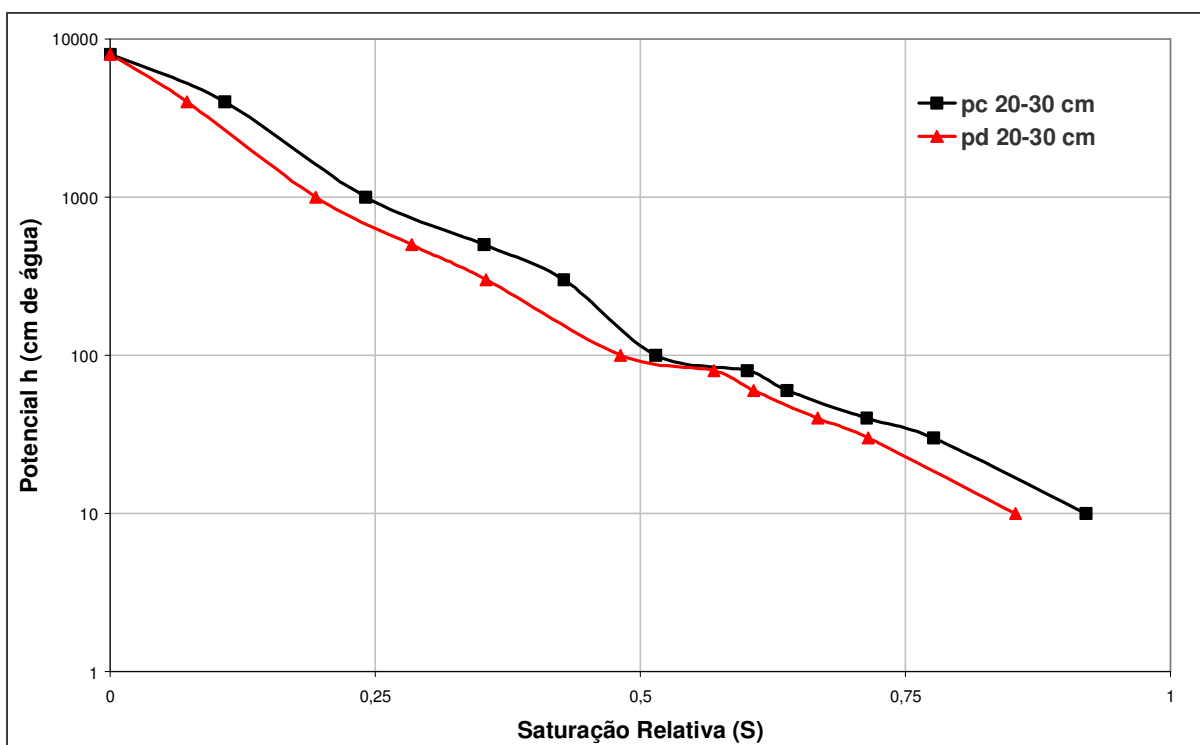


FIGURA 3.2.5. Curvas de retenção do solo na camada de 20-30 cm, para os dois sistemas de manejo.

Pela análise dos gráficos da figura (3.2.5), percebe-se que até potenciais de aproximadamente 100 cm de água (raios de poro de  $14,9\mu\text{m}$ ), não são evidentes as diferenças entre os sistemas de manejo. Acima desse valor de potencial, o solo sob o sistema de plantio direto retém menos fortemente a água em seu interior quando em comparação ao sistema de plantio convencional. Isso ocorreu mesmo sendo a macroporosidade do solo sob o plantio direto maior que a do solo sob o plantio convencional de  $0,06\text{ g/cm}^3$  (PC) contra  $0,09\text{ g/cm}^3$  (PD) e a microporosidade do solo sob sistema de plantio direto maior que a do solo sob sistema de plantio convencional de  $0,47\text{ g/cm}^3$  (PC) contra  $0,50\text{ g/cm}^3$  (PD). Portanto, novamente se

observa um reflexo não muito evidente das medições de densidade, macro e microporosidade do solo nas características de retenção de água pelo solo.

Assouline et al (2006), relata que, por exemplo, a densidade é uma quantidade integrativa, a qual fornece uma visão global ou macroscópica do sistema poroso do solo. Relata que devido ao processo de compactação, mudanças bruscas na distribuição dos poros do sistema poroso do solo, na tortuosidade ou conectividade desses poros, pode não produzir mudanças drásticas ou importantes na densidade do solo.

Os gráficos da figura (3.2.6) apresentam as curvas de retenção para a camada de 30-40 cm, dos solos sob os dois sistemas de manejo.

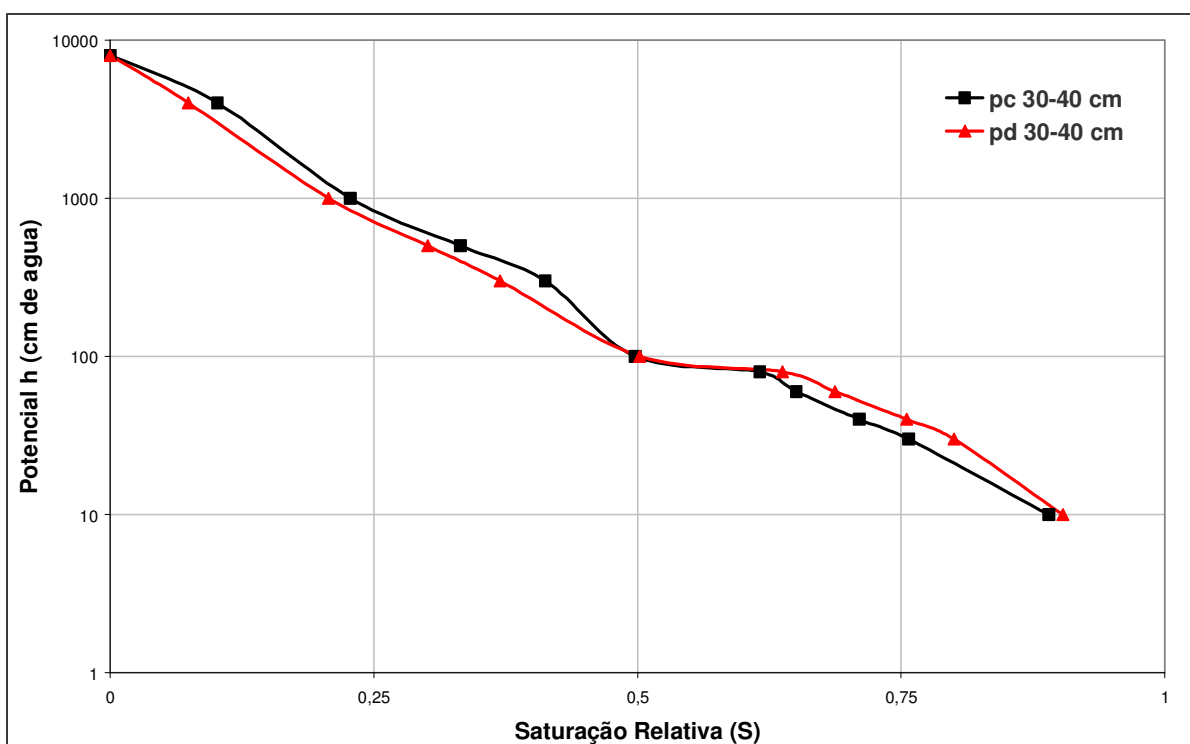


FIGURA 3.2.6. Curvas de retenção do solo na camada, 30-40 cm, para os dois sistemas de manejo.

Pelos gráficos da figura (3.2.6), percebe-se que a retenção de água é muito parecida para os dois sistemas de manejo. Se analisarmos as figuras (3.2.3), (3.2.4) e (3.2.5), percebe-se uma gradual redução das diferenças nas curvas de retenção de água entre os sistemas de manejo, indicando que, em profundidade os sistemas de manejo do solo têm pouca influência sobre as propriedades de retenção de água pelo solo.

D'HAENE et al. (2008), em estudos comparando solos sob sistemas de plantio direto e convencional relatam que diferenças nas propriedades físicas do solo tendem a ser minimizadas quando camadas mais profundas do solo são investigadas. Ou seja, há pouca influência do sistema de plantio nas camadas mais profundas do solo.

Para finalizar a análise das curvas de retenção, apresenta-se a figura (3.2.7), na qual são mostradas as curvas de retenção médias de todas as profundidades, para os sistemas de manejo.

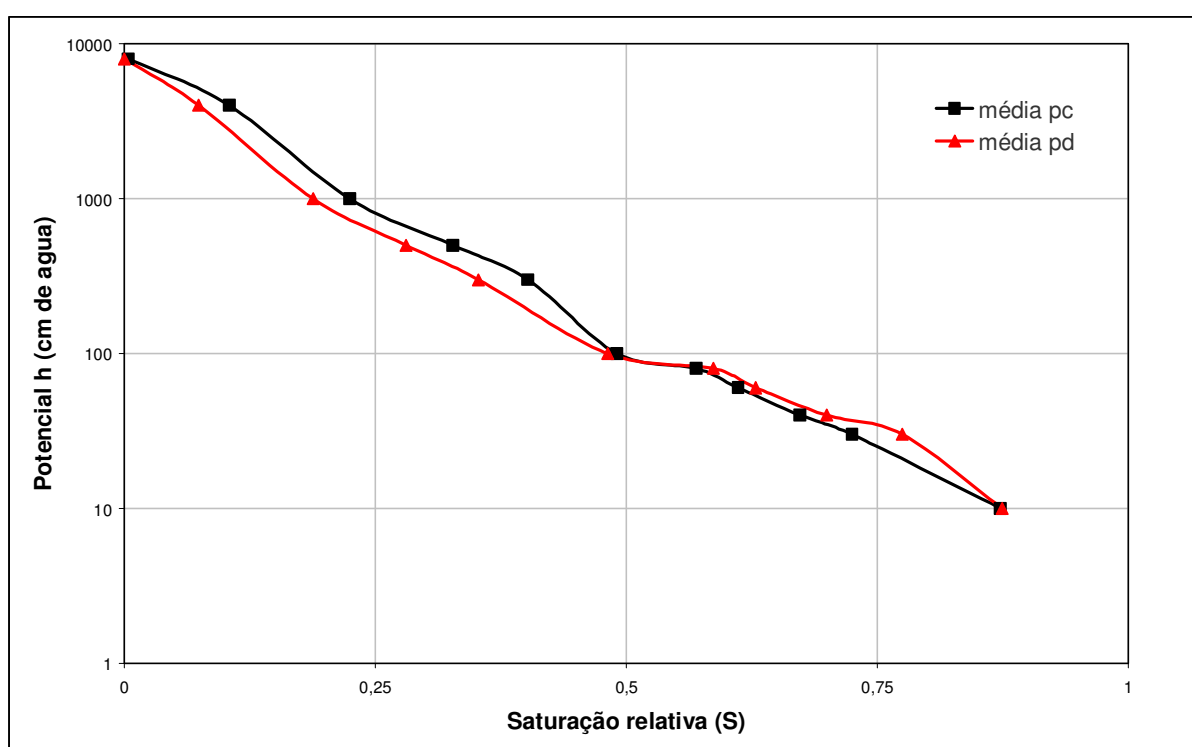


FIGURA 3.2.7. Curvas de retenção média para os dois sistemas de manejo.

O comportamento das curvas médias para ambos os sistemas de manejo mostrou-se bastante similar até potenciais de 100 cm de água (raios de poros de até  $14,9\mu\text{m}$ ). Após esse potencial, o solo sob o sistema de plantio convencional apresenta uma maior capacidade de retenção de água em seu interior.

O gráfico da figura (3.2.8) mostra os valores da saturação relativa (S) na capacidade de campo 300 cm de água (REICHARDT; TIMM, 2004 e WINTER, 1976) para os dois sistemas de plantio investigados.

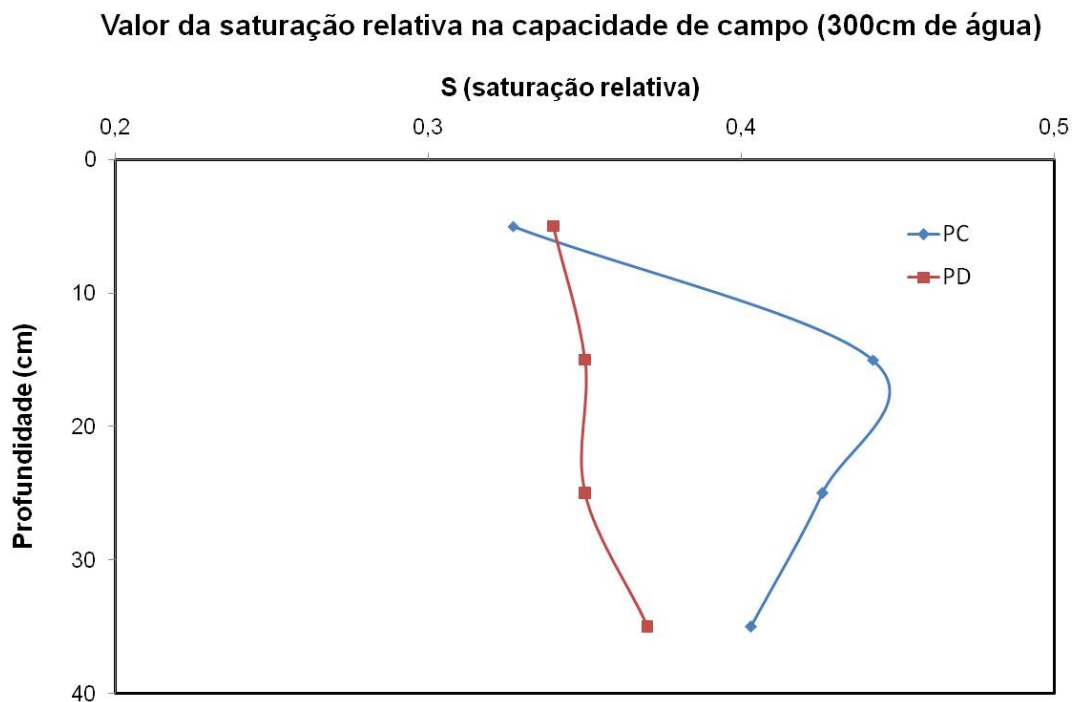


FIGURA 3.2.8: Saturação relativa (S) na capacidade de campo em 300 cm de água, para os dois sistemas de manejo e em profundidade.

Esse gráfico também evidencia o efeito do aumento da densidade e diminuição da macroporosidade do solo sob o plantio convencional, em profundidades abaixo dos 10 cm. Isso pode ser visto pelo fato de que, em média os valores de S para o solo sob sistema de plantio convencional são maiores que os apresentados pelo solo sob sistema de plantio direto. Ou seja, torna-se mais difícil promover variações em S no solo sob o sistema de plantio convencional quando comparado ao solo sob o sistema de plantio direto.

Como foi descrito em seções anteriores e no anexo A, a interpolação da curva de saturação relativa pelo método de ajuste “spline cúbico” e sua primeira derivada permitem a obtenção da curva de distribuição de poros (CDP) do solo.

A figura (3.2.9) apresenta as curvas de distribuição de poros (CDP) para o solo sob o sistema de plantio convencional, nas diferentes profundidades investigadas.

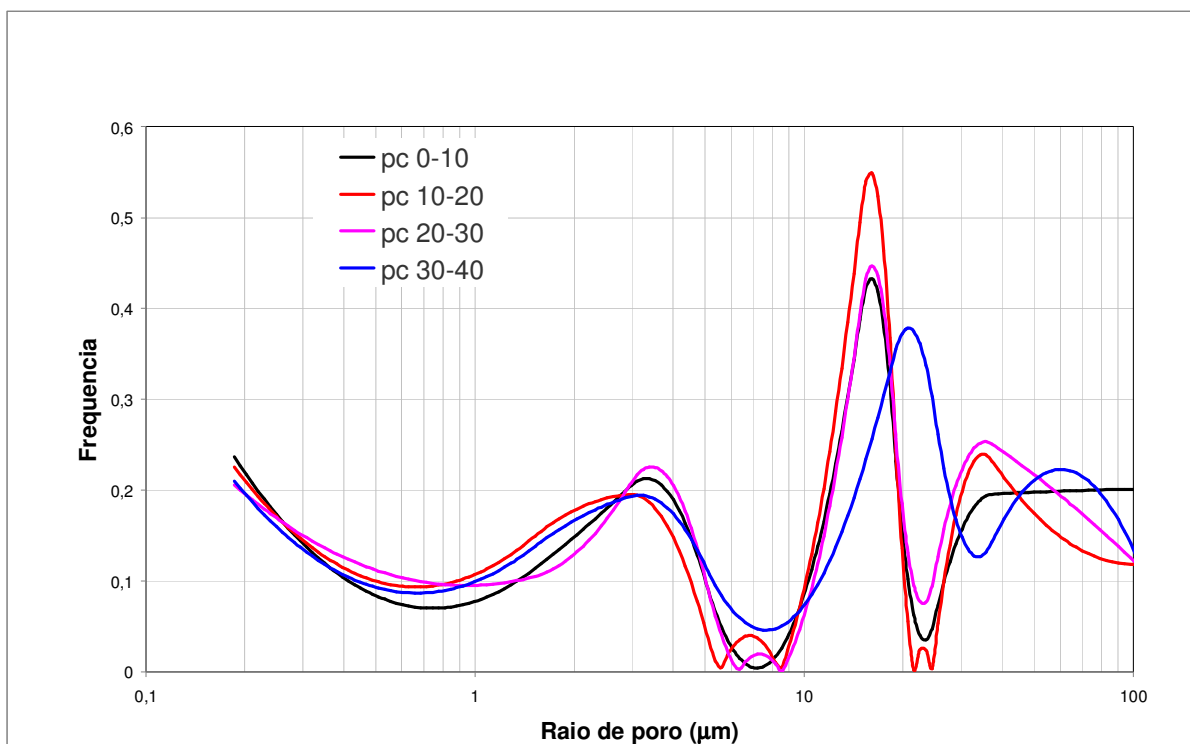


FIGURA 3.2.9: CDPs para o sistema de plantio convencional nas diferentes profundidades investigadas.

Com base no que é mostrado no gráfico (3.2.9), percebe-se, com exceção da curva na camada de (0-10 cm), que a distribuição de poros é do tipo tri-modal. Isso se deve ao aparecimento de três picos na CDP, o primeiro numa região entre 1 e 6 $\mu\text{m}$ , o segundo entre 7 e 25 $\mu\text{m}$  e o terceiro acima de 25 $\mu\text{m}$ . (KUTILEK et al, 2006). Ainda com base nesse gráfico e de acordo com a classificação adotada neste trabalho (EMBRAPA, 1997) percebe-se que em todas as profundidades a distribuição dos poros do solo está em grande parte localizada na região de microporos (poros com raios médios abaixo de 25 $\mu\text{m}$ ).

Devido à grande diferença entre as CDPs, principalmente na região de poros com raios maiores que 10 $\mu\text{m}$ , percebe-se que a estrutura do solo para sistema de plantio convencional é bastante variável nas diferentes profundidades, indicando que o revolvimento do solo afeta de forma generalizada a estrutura porosa do solo. Segundo (RICHARD et al., 2001; RASMUSSEN, 1999), poros com tamanhos acima de 30 $\mu\text{m}$  são mais suscetíveis a variações devido ao sistema de manejo. Sendo



assim, mudanças na estrutura ocasionadas por compactação ou processos naturais influenciam diretamente esta faixa de poros.

A figura (3.2.10) apresenta as curvas de distribuição e poros (CDPs) para o sistema de plantio direto.

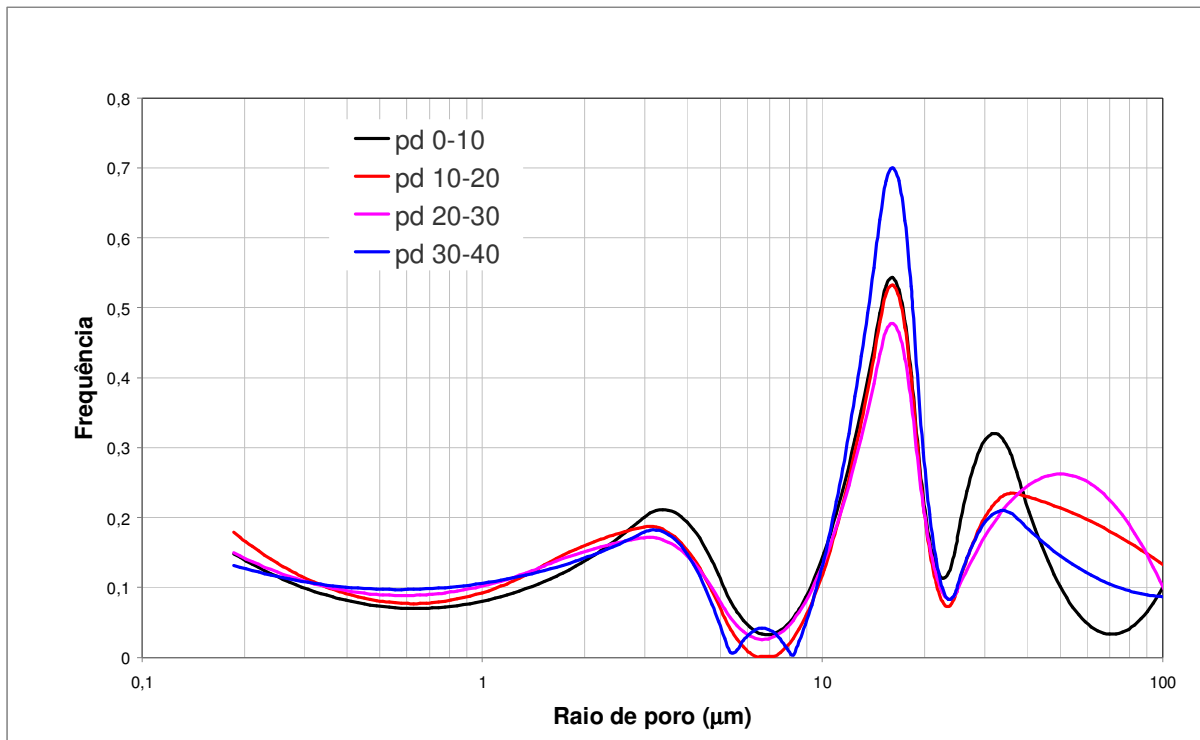


FIGURA 3.2.10: CDPs para o sistema de plantio direto nas diferentes profundidades investigadas.

Com base na no que é mostrado no gráfico da figura (3.2.10) as CDPs apresentam também uma estrutura tri-modal com os picos localizados nas mesmas regiões em que eles foram encontrados para o solo sob o plantio convencional.

Qualitativamente, devido a uma maior proximidade entre as CDPs, pode-se dizer que o sistema de plantio direto possui uma maior homogeneidade estrutural quando comparado ao sistema de plantio convencional. As maiores diferenças entre as CDPs são observadas para poros de raios acima de  $20\mu\text{m}$ . Convém ressaltar que para ambas as figuras (3.2.9) e (3.2.10), a distribuição de poros poderia ser quadri-modal, se potenciais mais altos pudessem ser investigados.

Nos gráficos da figura (3.2.11) são apresentadas as CDPs dos solos da camada de 0-10 cm dos dois sistemas de plantio.

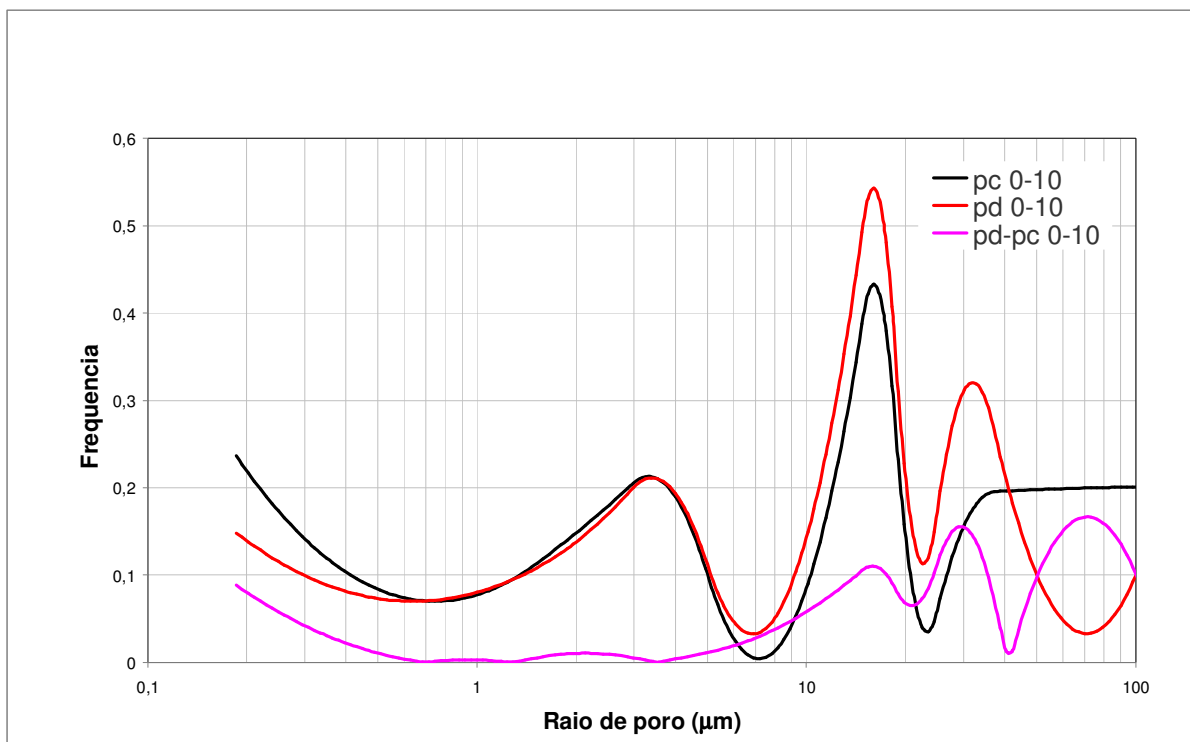


FIGURA 3.2.11: CDPs da camada de 0-10 cm para os dois sistemas de manejo. A curva em rosa representa a diferença entre as CDPs dos dois manejos.

Para essa profundidade, na região de raios de poros entre  $1\mu\text{m}$  e  $6\mu\text{m}$ , há uma diferença muito pequena entre as CDPs, indicando que, de acordo com essa análise, os sistemas de manejo não modificaram esta classe de poros.

Outro detalhe importante a respeito dos solos dessa camada é que o solo sob o sistema de plantio direto apresenta uma melhor estruturação em comparação ao solo sob o sistema de plantio convencional. Isto se deve ao fato de a CDP do solo sob o sistema de plantio direto apresentar três picos bem definidos, enquanto que a CDP do sistema de plantio convencional apresenta o terceiro pico bastante difuso na região de raios de poros maiores que  $25\mu\text{m}$ . (KUTILEK et al, 2006).

Para uma comparação quantitativa, as CDPs foram divididas em 3 regiões, denominadas de 1, 2 e 3, as quais correspondem, respectivamente, aos raios de poros localizados entre:  $1\mu\text{m}$  e  $6\mu\text{m}$ ,  $7\mu\text{m}$  e  $25\mu\text{m}$  e  $25\mu\text{m}$  e  $100\mu\text{m}$ , como foi dito, as regiões nas quais os picos das CDPs estão aproximadamente localizados. As áreas sob a curva nessas regiões foram calculadas e divididas pela área total sob a CDP.

O resultado obtido nessa divisão representa a porcentagem da distribuição de poros em cada uma das regiões em relação à total.

Os gráficos da figura (3.2.12) apresentam as porcentagens de aparecimento das áreas nas regiões 1, 2 e 3 para os dois sistemas de manejo na camada superficial 0-10 cm.

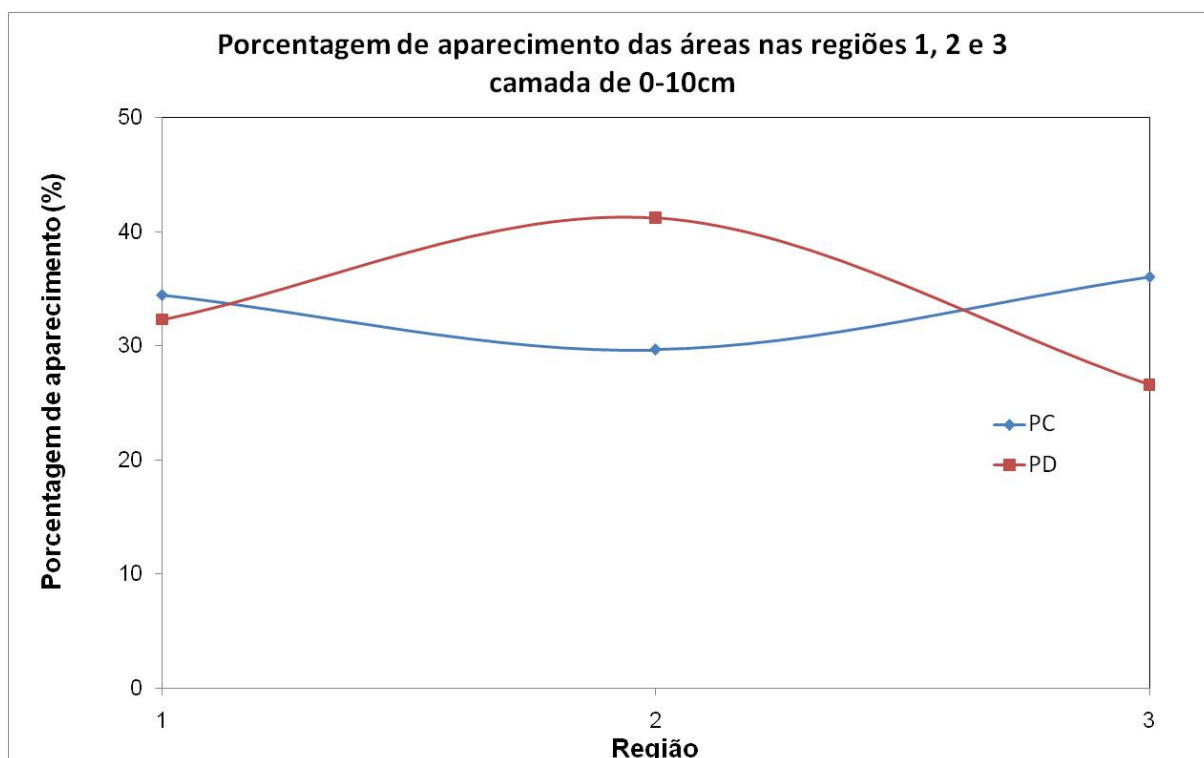


FIGURA 3.2.12: Porcentagem de aparecimento das áreas nas regiões 1, 2 e 3 para os dois sistemas de manejo, na camada de 0-10 cm.

Com base nos gráficos da figura (3.2.12), tem-se que: a) a porcentagem de aparecimento de poros na região 1 é aproximadamente 6% maior para o PC em comparação ao PD (0,32 contra 0,36); b) para a região 2 a porcentagem de aparecimento de poros para o PC é aproximadamente 41% menor que no PD (0,41 contra 0,3); e c) a porcentagem de aparecimentos de poros na região 3 é 39% maior no PC que no PD (0,36 contra 0,26).

Desta forma, a camada superficial de 0-10 cm para sistema de plantio direto, encontra-se mais compacta que a mesma camada no sistema de plantio convencional. Isso se deve a uma maior presença de poros na região 2 e menor na região 3. Ou seja, uma maior presença de poros entre 7 e 25 $\mu$ m e menor presença de poros entre 25 e 100 $\mu$ m. O número de poros da região 1, poros de raios entre 1 e

6 $\mu$ m, frente às outras variações, foi praticamente o mesmo para os dois sistemas de plantio.

Portanto, a CDP refletiu o comportamento apontado pelas medições de macroporosidade e capacidade de retenção de água pelo solo. A maior capacidade de retenção apresentada pelo solo sob o PD se deve ao fato de que, em média, os poros desse solo estão concentrados com predominância na região 2 (poros entre 11 e 25 $\mu$ m) enquanto que para o solo sob o plantio convencional eles estão concentrados predominantemente na região 3 (poros entre 25 e 100 $\mu$ m). Sabe-se que solos com predominância de poros maiores são mais fáceis de serem drenados (secos). A maior macroporosidade do solo sob o PC adveio da predominância dos poros de raios entre 25 e 100 $\mu$ m neste solo.

Finalmente, a semelhança entre as CRs para altos valores de potencial vem do fato de que não há muita diferença entre o volume de poros da região 1 (com raios entre 1 e 7 $\mu$ m; valores de potencial entre 200 e 1490cm de água) nos dois tipos de sistemas de plantio.

O gráfico (3.2.13) apresenta as CDPs para os solos sob os sistemas de manejo direto e convencional, na camada de 10-20 cm.

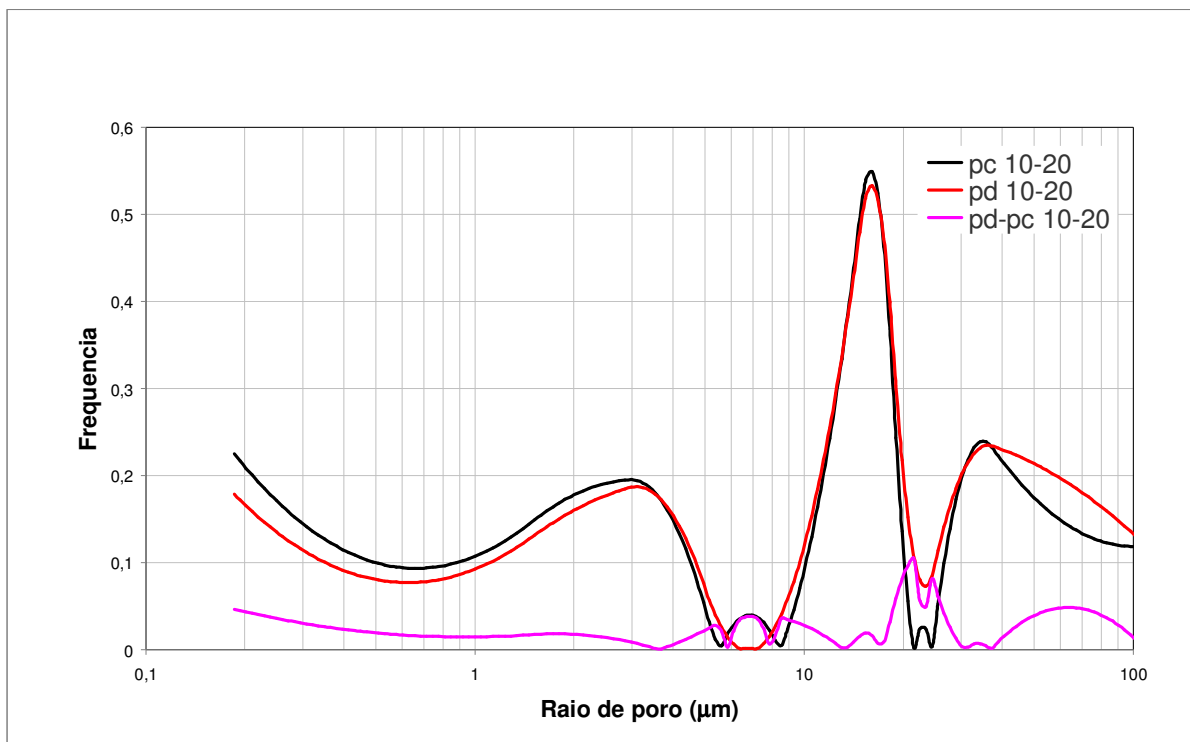


FIGURA 3.2.13: CDPs da camada de 10-20 cm para os dois sistemas de manejo. A curva em rosa representa a diferença entre as CDPs dos dois manejos.

A comparação entre as CDPs mostra que a distribuição de poros para os solos da camada de 10-20cm não é muito diferente nos dois sistemas de manejo. Porém, uma informação bastante importante, e que deve ser notada na CDP do solo sob sistema de plantio convencional, é que houve uma recuperação da estrutura deste solo nessa camada de 10-20 cm em relação à situação apresentada por ele na camada de 0-10 cm. Isso se deve à presença de forma clara e inequívoca do terceiro pico na região 3, correspondente à região dos poros com raios maiores do que 25 $\mu$ m.

Os gráficos da figura (3.2.14) apresentam os valores de área sob a curva nas regiões 1, 2 e 3 para os solos dos dois plantios na camada entre 10 e 20 cm de profundidade.

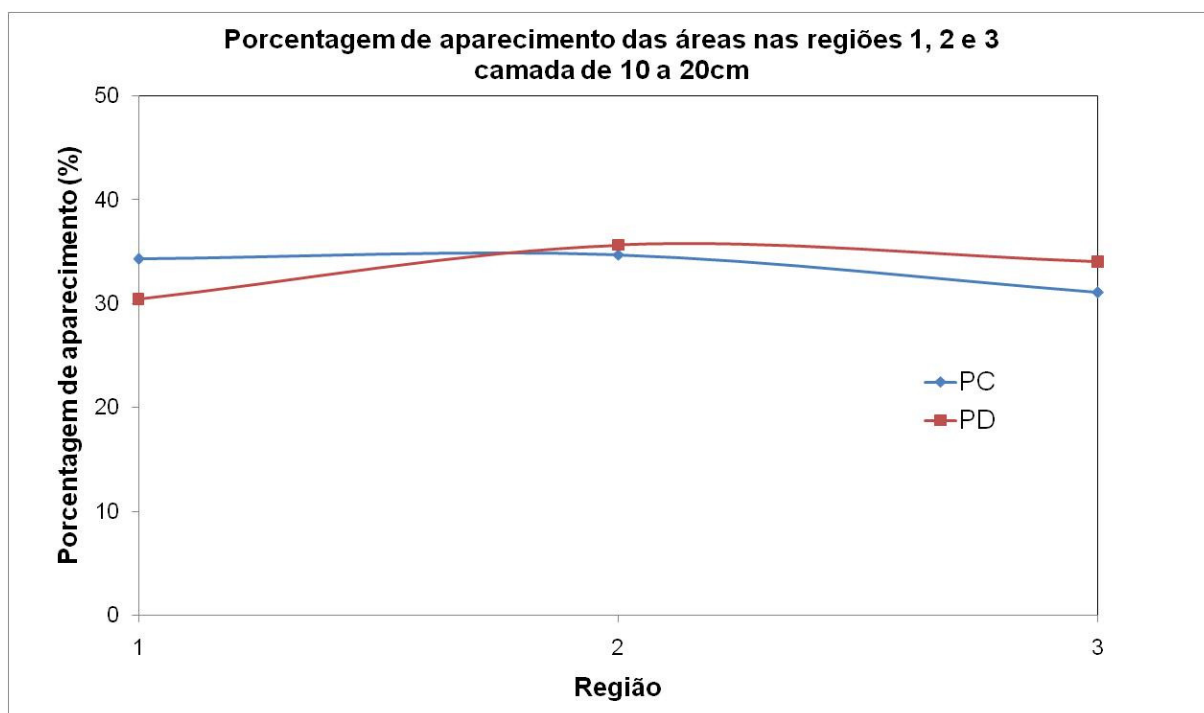


FIGURA 3.2.14: Porcentagem de aparecimento das áreas nas regiões 1, 2 e 3 para os dois sistemas de manejo, na camada de 10-20 cm.

Apesar das semelhanças entre as CDPs é possível verificar que o sistema de plantio convencional, em comparação ao direto, encontra-se levemente mais compacto. Isso se deve ao fato de que o solo sob o sistema de plantio convencional apresenta uma porcentagem 13% menor de poros na região 3, a referente a macroporos (poros acima de 25 $\mu$ m de raio), e ao mesmo tempo uma porcentagem 10% maior de poros na região 1 (poros com diâmetros entre 1 e 7 $\mu$ m). A

porcentagem de poros na região 2 (raios de poros entre 7 e 25 $\mu\text{m}$ ) foi praticamente a mesma para o solo nos dois sistemas de manejo, uma diferença menor do que 3% entre as porcentagens de aparecimento dos poros.

Esta pode ser a explicação de que a CR do solo sob o sistema de plantio convencional ter indicado que ele é, em média, mais difícil de ser drenado (seco), para todas as regiões de potenciais investigados (figura 3.2.4) quando comparado ao solo sob o sistema de plantio direto. Também, a maior macroporosidade verificada para o solo sob plantio direto (0,09 contra 0,06) advém do fato de que a porcentagem de aparecimento dos poros na região 3 (poros com raios acima de 25 $\mu\text{m}$ ) na CDP é cerca de 13% maior no solo sob o sistema de plantio direto.

O gráfico da figura (3.2.15) mostra as CDPs para os sistemas de manejo na camada de 20-30 cm.

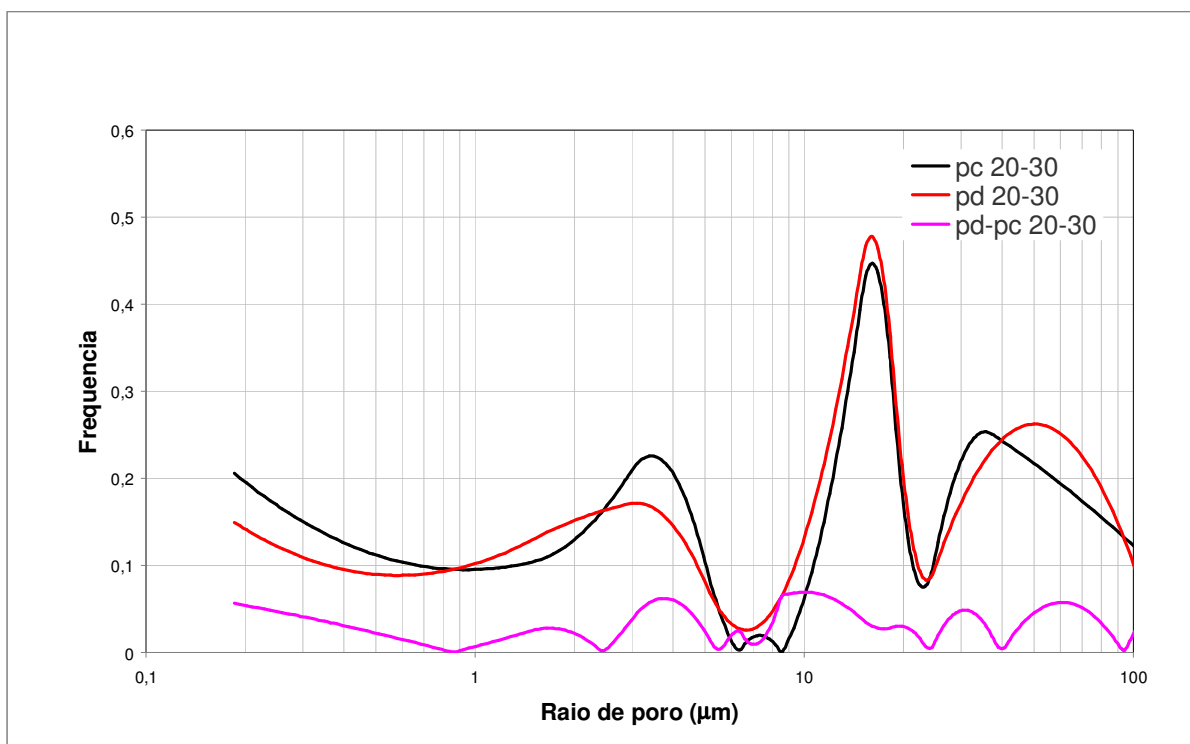


FIGURA 3.2.15: CDPs da camada de 20-30 cm para os dois sistemas de manejo. A curva em rosa representa a diferença entre as CDPs dos dois manejos.

Os gráficos da figura (3.2.15) apresentam as áreas sob as CDPs nas regiões 1, 2 e 3, para os dois sistemas de manejo, na camada de 20-30 cm.

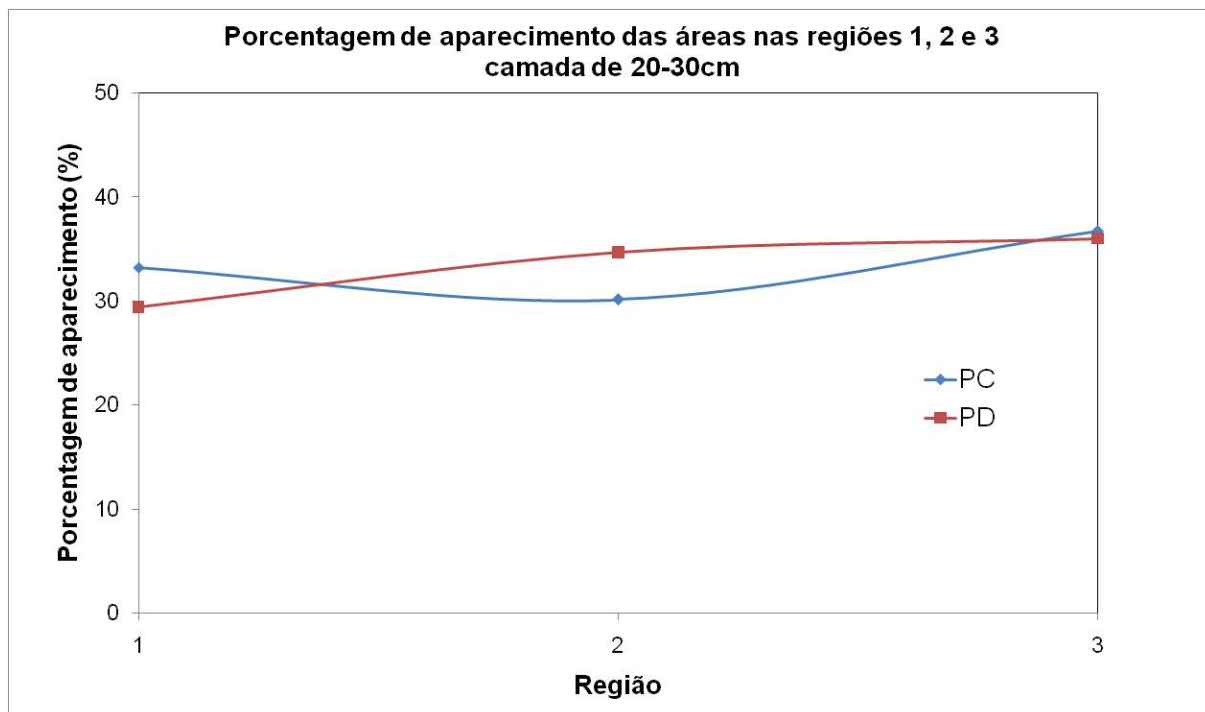


FIGURA 3.2.16: Porcentagem de aparecimento das áreas nas regiões 1, 2 e 3 para os dois sistemas de manejo, na camada de 20-30 cm.

Com base nos gráficos das figuras (3.2.15) e (3.2.16), destaca-se que o solo sob o sistema de plantio direto, quando comparado ao solo sob sistema de plantio convencional, possui: 12% menos poros na região 1 (poros entre 1 e  $7\mu\text{m}$ ); 15% mais poros na região 2 (raios de poros entre 7 e  $25\mu\text{m}$ ); e praticamente o mesmo número de poros na região 3 (uma diferença menor do que 2%). Desta forma, a compactação do solo sob o PC fez, basicamente, com que poros da região 2 (poros entre 7 e  $25\mu\text{m}$ ) se transformassem em poros localizados na região 1 (entre 1 e  $7\mu\text{m}$ ).

A Figura (3.2.17) apresenta a CDPs para os sistemas de manejo para a camada de 30-40 cm.

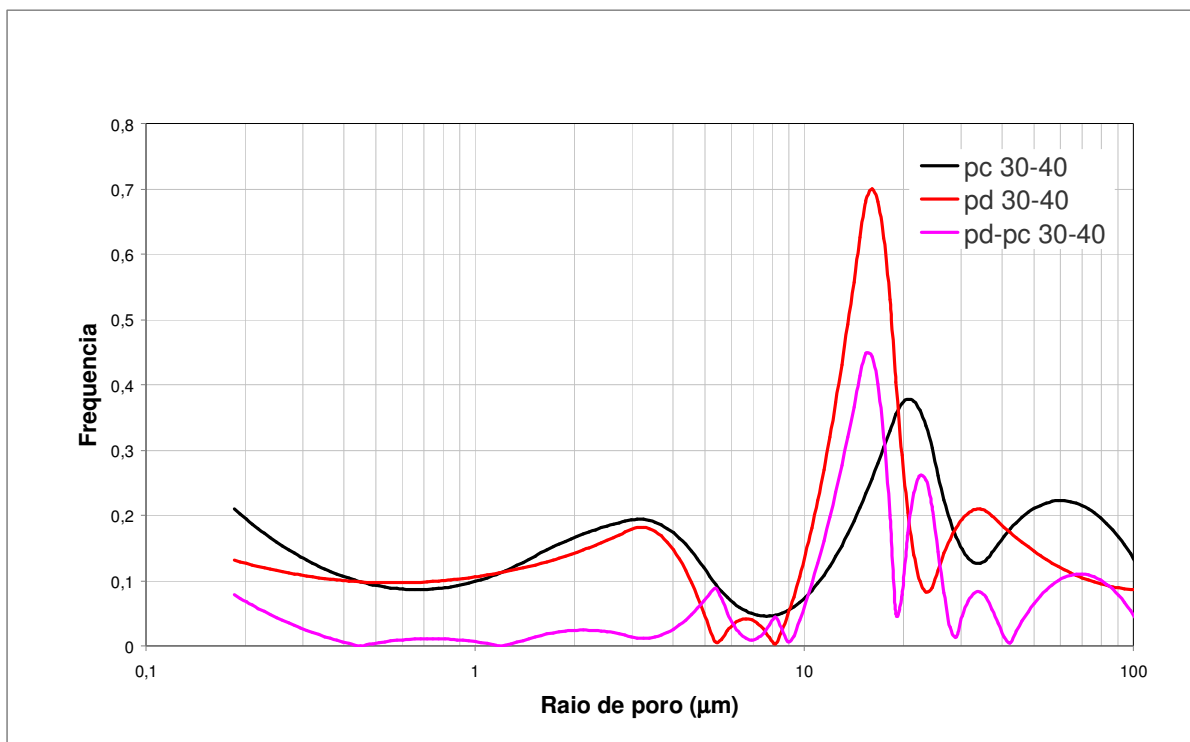


FIGURA 3.2.17: CDPs da camada de 30-40 cm para os dois sistemas de manejo. A curva em rosa representa a diferença entre as CDPs dos dois manejos.

As CDPs na camada 30-40 cm (figura 3.2.17) apresentaram um comportamento bastante diferente do que se viu até agora.

A única explicação que se sugere baseia-se nos dados apresentados na tabela (3.2.1).

TABELA 3.2.1: Características físicas fornecidas pelo IAPAR referentes as área de plantio.

Horizontes	Profundidade cm	Composição Granulométrica (%)			Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade (%)		
		Areia	Silte	Argila	Aparente	Total	Macro	Micro
Ap <sup>1</sup>	0-14	6	30	64	1,01	56	13	39,2
Ap <sup>2</sup>	14-32	6	19	75	1,19	52	5	43,4
AB	32-60	6	14	80	--	--	--	--
BA	60-120	6	13	81	--	--	--	--
BW	120-160	5	16	79	0,93	56	9	44,0



Na tabela (3.2.1) verifica-se que existe uma mudança do horizonte Ap2 para AB a partir de 32 cm de profundidade. Esta mudança de horizonte pode ter alterado a característica estrutural do solo, modificando fortemente as CDPs do solo nesta profundidade.

Os gráficos da figura (3.2.18) apresentam as áreas sob as CDPs nas regiões 1,2 e 3, para os dois sistemas de manejo, na camada de 30-40 cm.

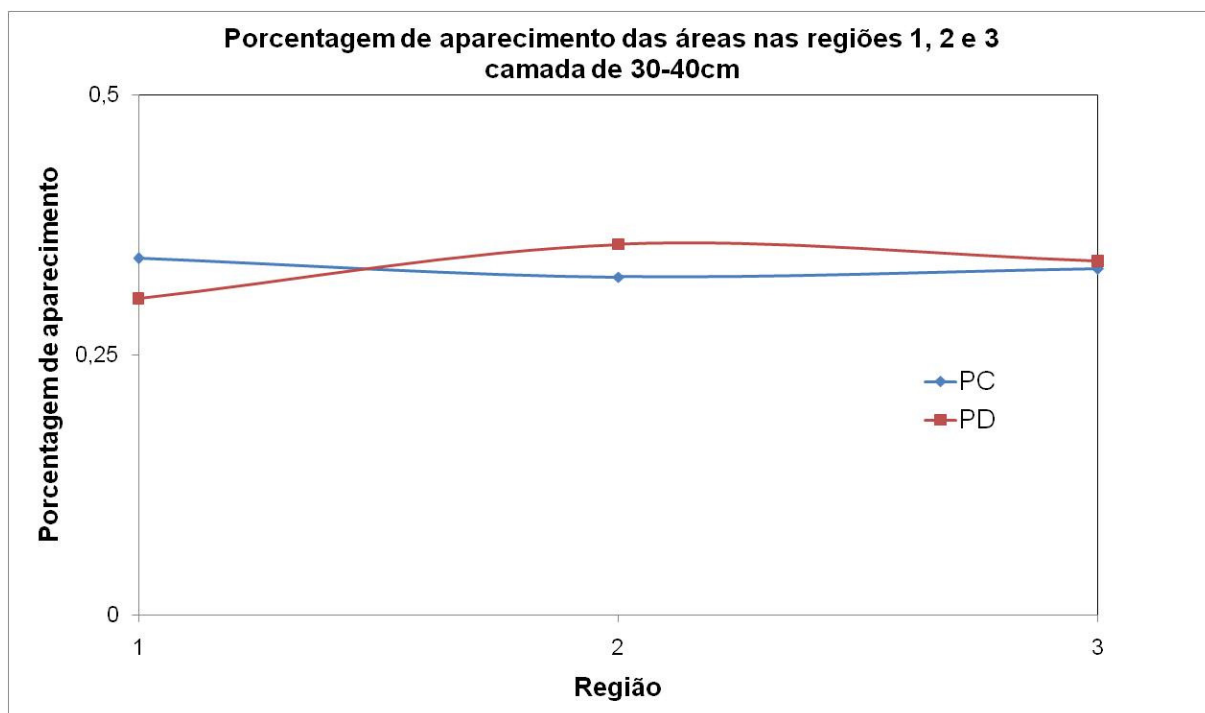


FIGURA 3.2.18: Porcentagem de aparecimento das áreas nas regiões 1, 2 e 3 para os dois sistemas de manejo, na camada de 30-40 cm.

Analisando as áreas sob as CDPs, percebe-se um maior número de poros na região 2 com menor número de poros na região 1 para o solo sob o sistema de plantio direto. No entanto, como foi dito anteriormente, nessa camada houve um comportamento atípico da CDP referente ao solo sob o sistema de plantio convencional. Se for observado há um deslocamento bastante acentuado dos picos das regiões 2 e 3 da CDP desse solo. Portanto, uma comparação como as que foram realizadas anteriormente perdem um pouco o sentido e não foram feitas com maior profundidade. Como últimas análises, são apresentadas as diferenças entre as CDPs ao longo da profundidade de amostragem, para os dois sistemas de manejo, excetuando-se a camada de 30-40 cm devido aos resultados bastantes diferentes das camadas mais superficiais, a qual, pelo que ficou sugerido anteriormente, trata-se de um outro horizonte do solo.

Os gráficos das figuras (3.2.19) e (3.2.20) apresentam as CDPs para o solo sob o sistema de plantio convencional, respectivamente, para as camadas de 0-10 cm e 10-20 cm e 10-20 e 20-30 cm.

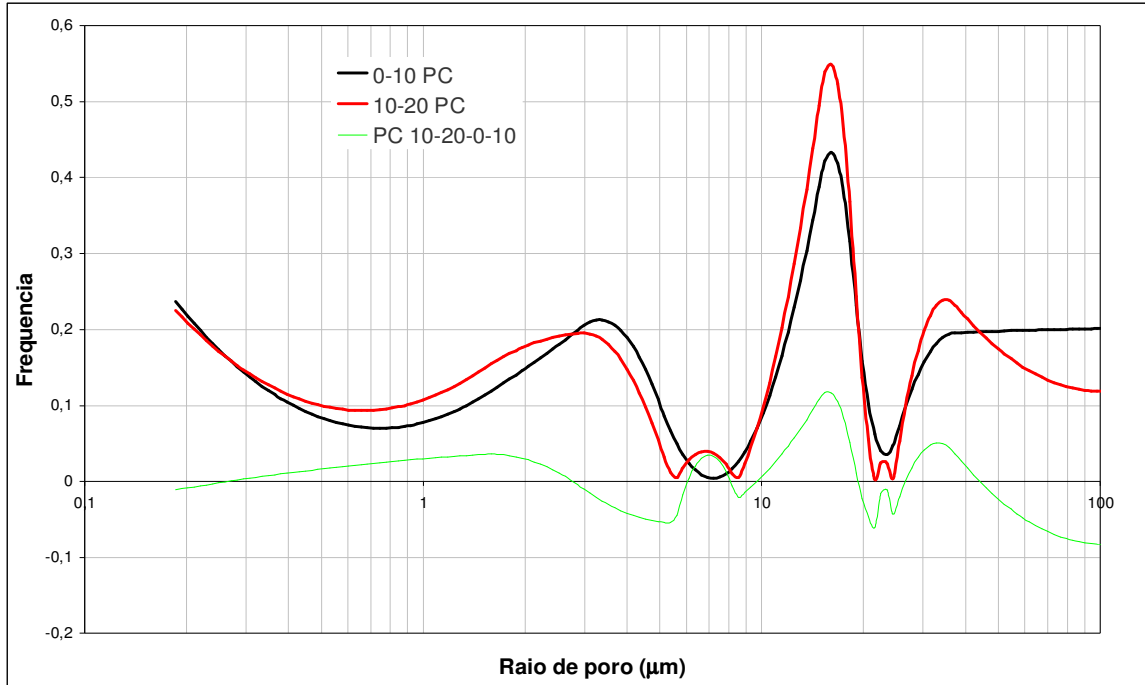


FIGURA 3.2.19: CDPs das camadas de 0-10 e 10-20 cm do sistema de plantio convencional. A curva em verde representa a diferença entre essas CDPs.

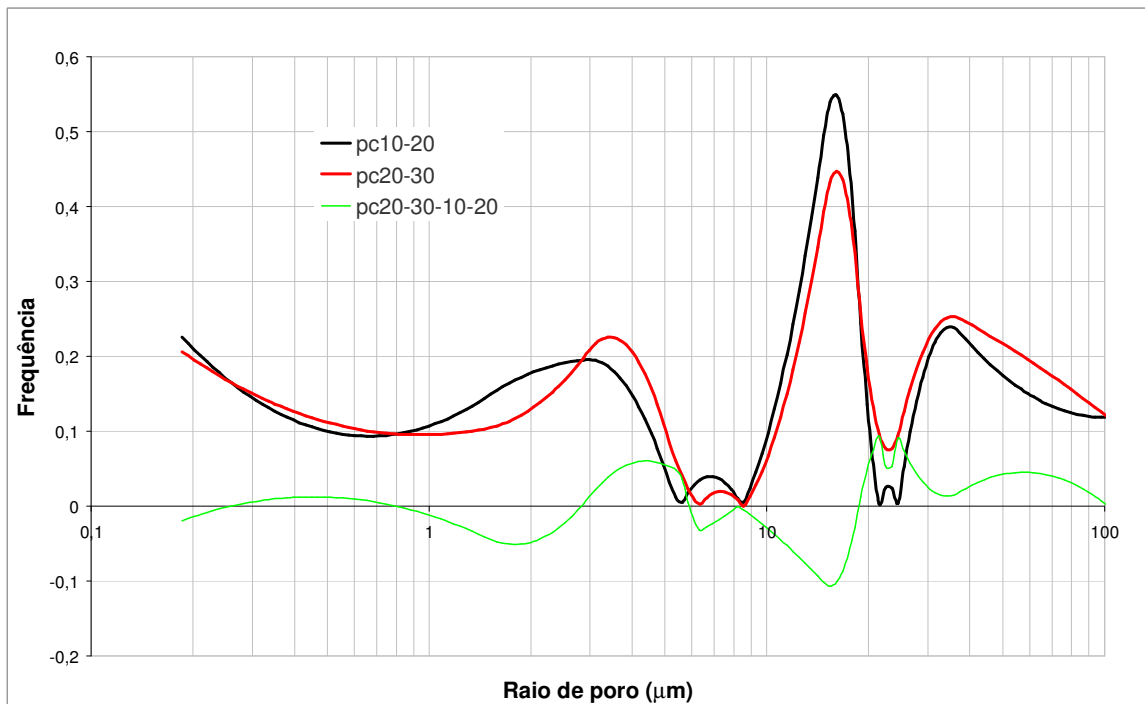


FIGURA 3.2.20: CDPs das camadas de 10-20 e 20-30 cm do sistema de plantio convencional. A curva em verde representa a diferença entre essas CDPs.

Na figura (3.2.21), apresentada a seguir, é apresentado o comportamento das porcentagens de aparecimento das áreas sob as CDPs nas regiões 1, 2 e 3 em função de uma profundidade média da camada de solo (5, 15 e 25cm), para o solo do plantio convencional.

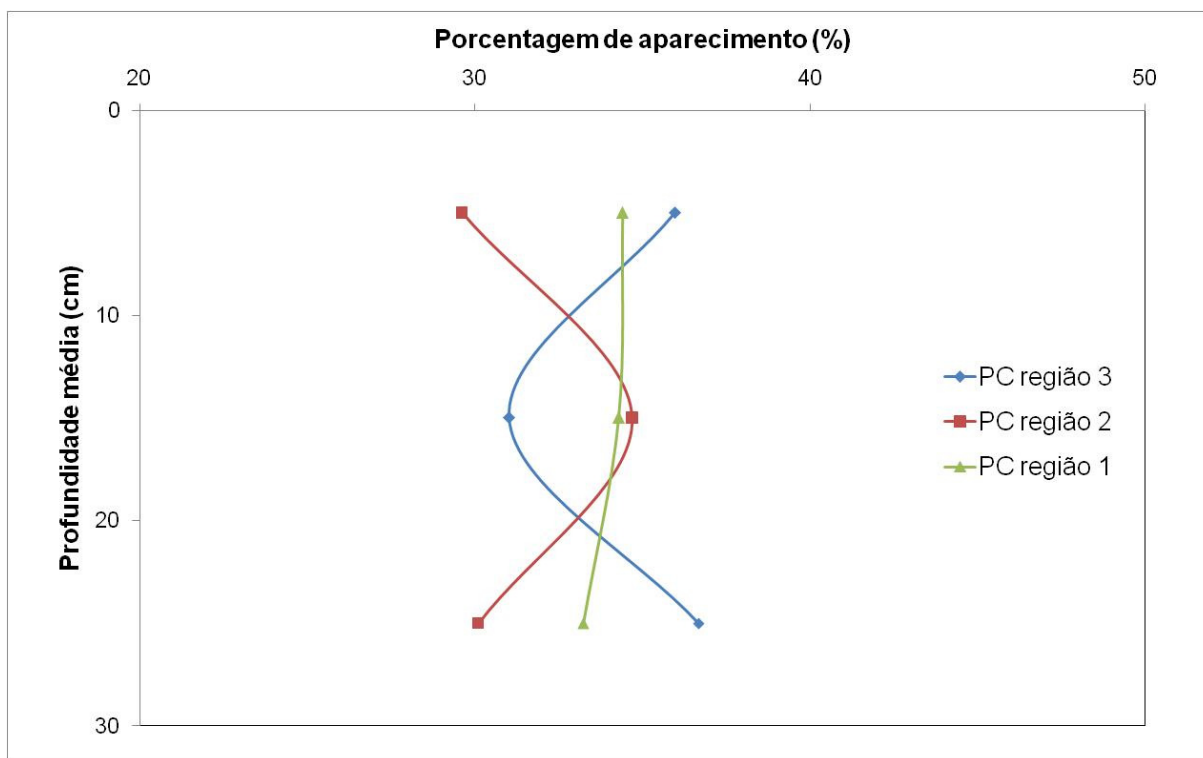


FIGURA 3.2.21. Porcentagem de aparecimento de poros sob as áreas nas regiões 1, 2 e 3 para o sistema de plantio convencional em função da profundidade média.

Comparando-se as CDPs e as curvas de distribuição de áreas dessas camadas figuras (3.2.19; 3.2.20 e 3.2.21), percebe-se que a camada de 10-20 cm, em comparação às camadas adjacentes no perfil do solo sob o plantio convencional, é a que possui o maior número de poros na região 2 (entre 7 e 25 $\mu$ m) e a menor quantidade de poros na região 3 (poros acima de 25 $\mu$ m). A quantidade de poros na região 1 é a que menos sofreu variações em profundidade, indicando que esses poros (1 a 7 $\mu$ m) são muito pouco modificados por esse sistema de plantio.

Esse resultado explica, para as camadas de 0-10 e de 10-20cm, o aumento de densidade e diminuição da macroporosidade observadas para o perfil do solo sob o plantio convencional tabelas (3.1.3) e (3.1.4) e figura (3.1.1). No entanto, na camada mais profunda das três (20-30 cm) o aumento do número de poros da região 3 com diminuição do número de poros na região 2, em princípio, indicariam um solo

menos compactado, diferentemente do que os resultados das tabelas (3.1.3 e 3.1.4) indicam.

Os gráficos da figura (3.2.22) apresentam as CDPs do solo sob o plantio direto das camadas de 0-10 cm e 10-20 cm e a figura (3.2.23) apresenta as CDPs para o solo das camadas de 10-20 e 20-30 cm sob o mesmo sistema de plantio.

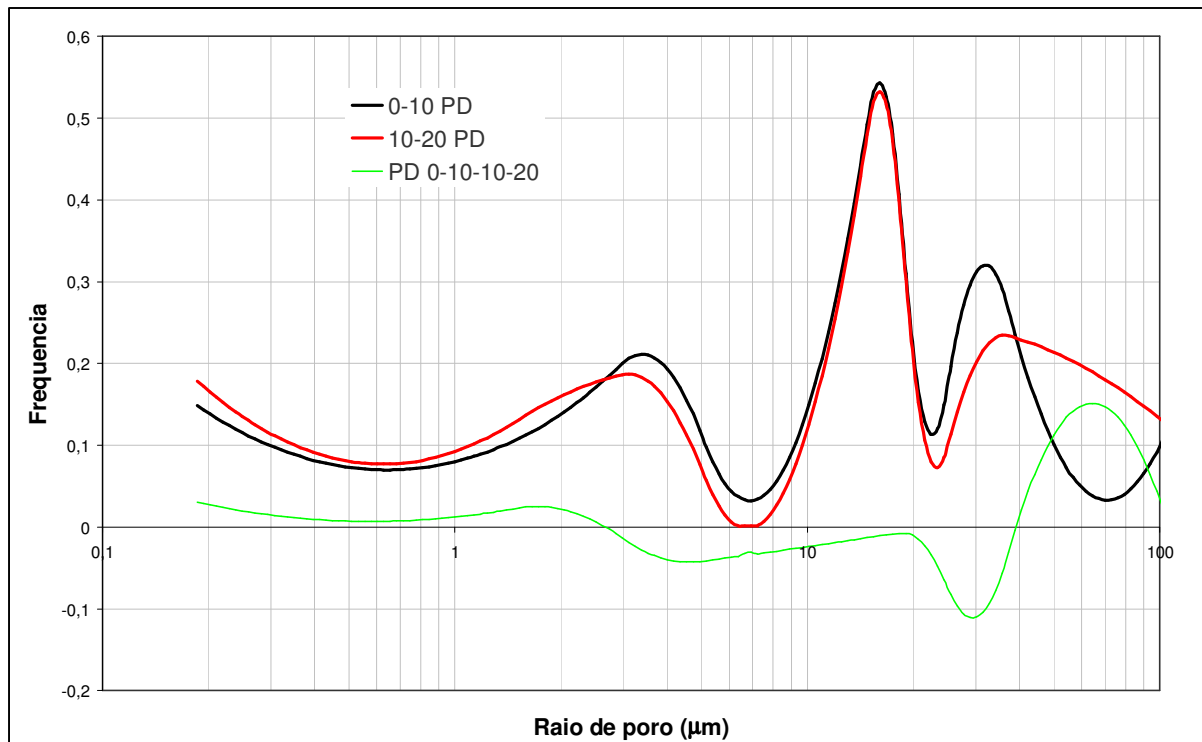


FIGURA 3.2.22: CDPs das camadas de 0-10 e 10-20 cm do sistema de plantio direto. A curva em verde representa a diferença entre essas CDPs.

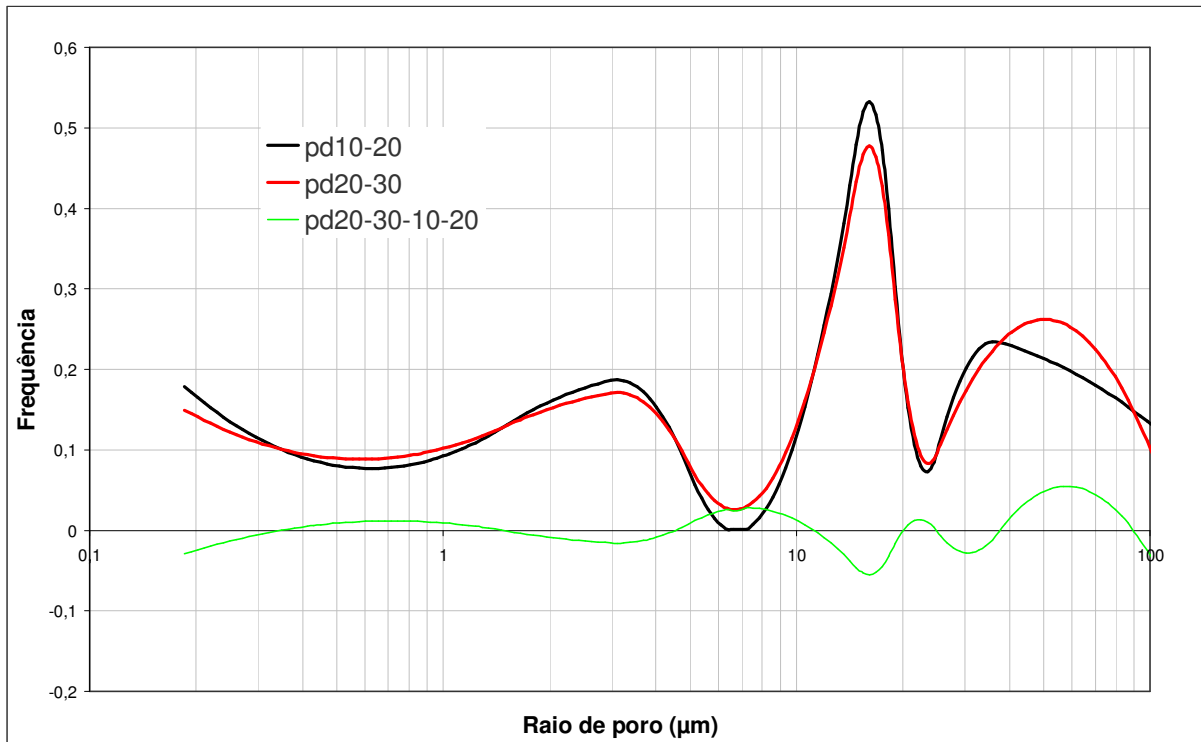


FIGURA 3.2.23: CDPs das camadas de 10-20 e 20-30 cm do sistema de plantio direto. A curva em verde representa a diferença entre essas CDPs.

Nos gráficos da figura (3.2.24) são apresentadas as porcentagens de distribuição de poros nas regiões 1, 2 e 3 para o perfil do solo sob o plantio direto.

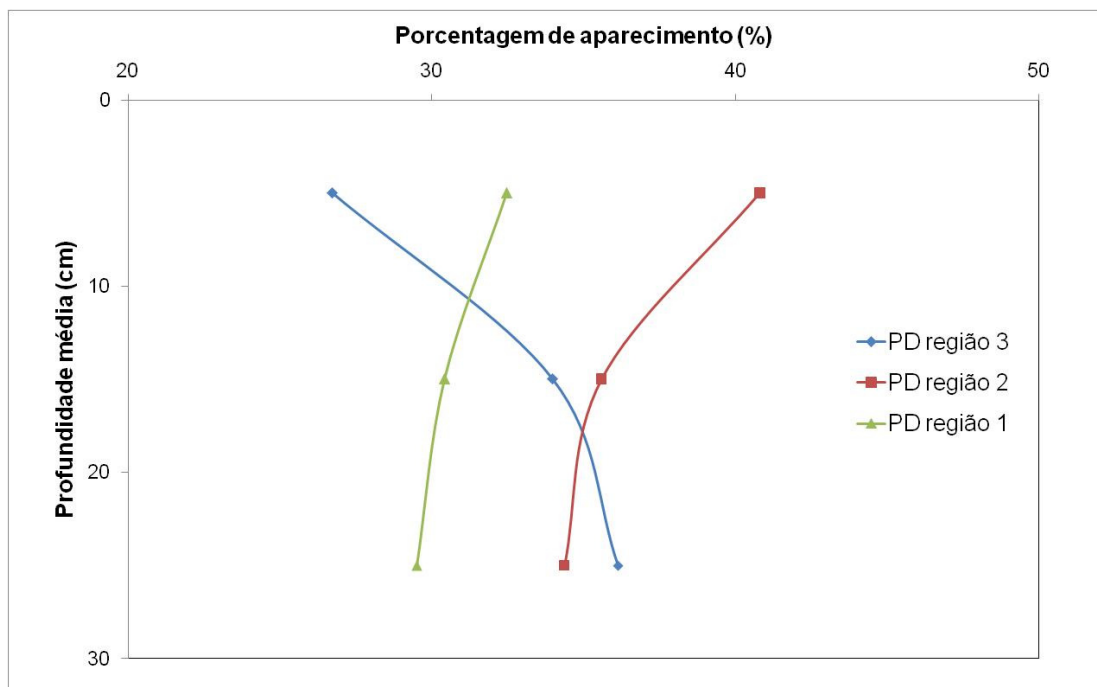


FIGURA 3.2.24. Porcentagem de aparecimento de poros sob as áreas nas regiões 1, 2 e 3 para o sistema de plantio direto em função da profundidade média.

Neste sistema de plantio ocorre algo bastante interessante. Na camada superficial, há uma grande diferença entre a quantidade de poros das regiões 3 e 2, com predominância dos poros desta ultima região (cerca de 50% a mais de poros na região 2). À medida que são investigadas camadas mais profundas, essa diferença diminui de tal maneira que o número de poros nessas duas regiões tende a ser o mesmo, em torno de 35% do total de poros, para cada região. Os poros da região 1 tiveram uma redução de 9% em quantidade ao serem analisadas a camada superficial e a camada de 20-30cm. Isso mostra que o sistema de manejo produziu uma camada superficial com maior número de poros na região 1 (entre 1 e 7 $\mu$ m).

Através dos cálculos de área das regiões 1,2 e 3, foi possível determinar valores de macroporosidade e microporosidade. A macroporosidade foi determinada pela área das CDPs acima de 25  $\mu$ m (região 3).

O gráfico da figura (3.2.25) apresenta os valores de macroporosidade e determinado através do cálculo das áreas das curvas de distribuição de poros CDPs excetuando a camada de 30-40 cm para os dois sistemas de manejo.

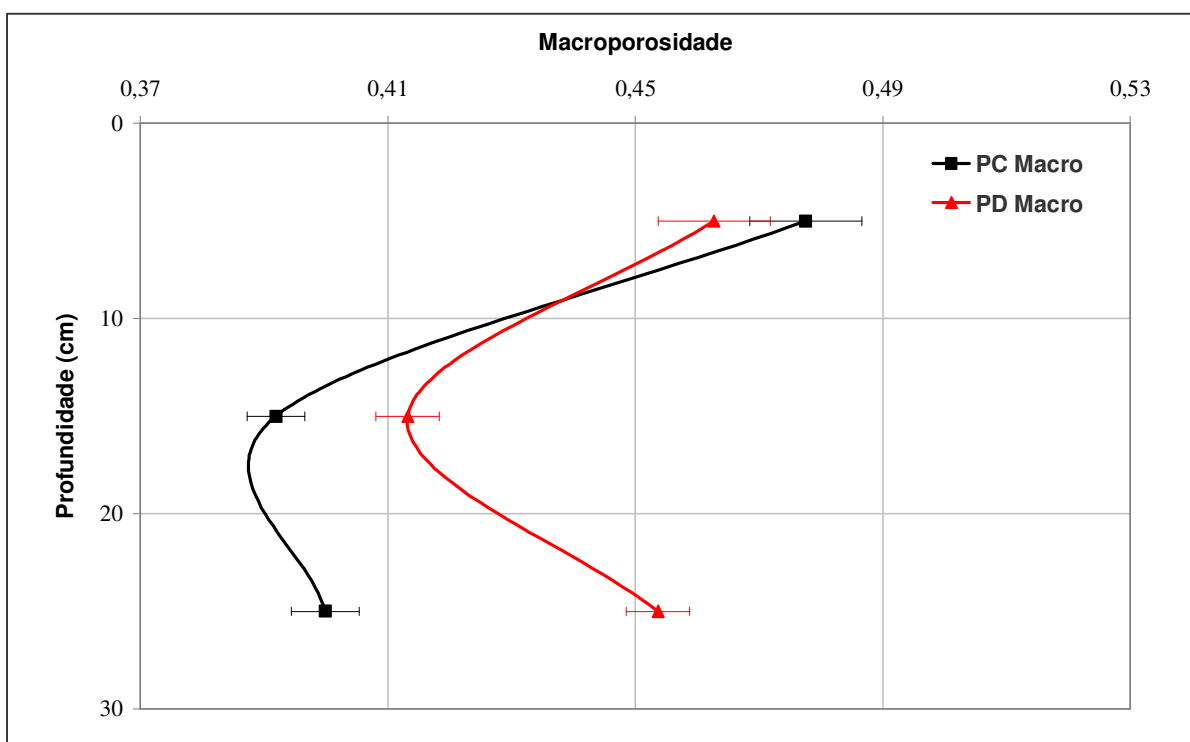


FIGURA 3.2.25: Macroporosidade determinada pelo calculo das CDPs para sistemas de plantio convencional (PC) e plantio direto (PD).

O gráfico (3.2.25) indica que, de forma geral, ambos sistemas de manejo apresentaram uma redução dos valores de macroporosidade ao longo da profundidade.

Comparando a camada de 10-20 cm com a camada de 0-10 cm para o sistema de plantio convencional e direto, verifica-se que houve redução de, respectivamente, cerca de 19% e 11% no volume de macroporos para estes sistemas. Portanto, isso indica que a camada de 10-20 cm encontra-se mais compacta, resultados que concordam com os resultados da tabela (3.1.1), gráfico (3.1.1) e tabela (3.1.2), onde se verificou um aumento de densidade entre estas camadas, entretanto, a tabela (3.1.2) apresentou concordância somente com o sistema e plantio convencional.

Para a camada de 20-30 cm verificou que em comparação a camada de 0-10 cm, houve redução de 17% e 2% , respectivamente para os sistemas de plantio convencional e direto. Isto indica que a camada de 20-30 cm, encontra-se levemente menos compacta que em relação à camada de 10-20 cm.

Entre os sistemas de manejo, verifica-se ainda que o sistema de plantio convencional apresentou maiores valores de macroporosidade na camada de 0-10 cm cerca de 4% maior que para o sistema de plantio direto, na camada de 10-20 a macroporosidade é cerca de 5% maior no sistema de plantio direto e na camada de 20-30 é 12% maior também para o sistema de plantio direto. Resultados estes que concordam com os gráficos (3.2.3;3.2.4;3.2.8;3.2.12 e 3.2.14).

O gráfico da figura (3.2.26) mostra os valores para a microporosidade do solo nos sistemas de manejo extraídos pelo cálculo das áreas das CDPs abaixo de 25 $\mu$ m.

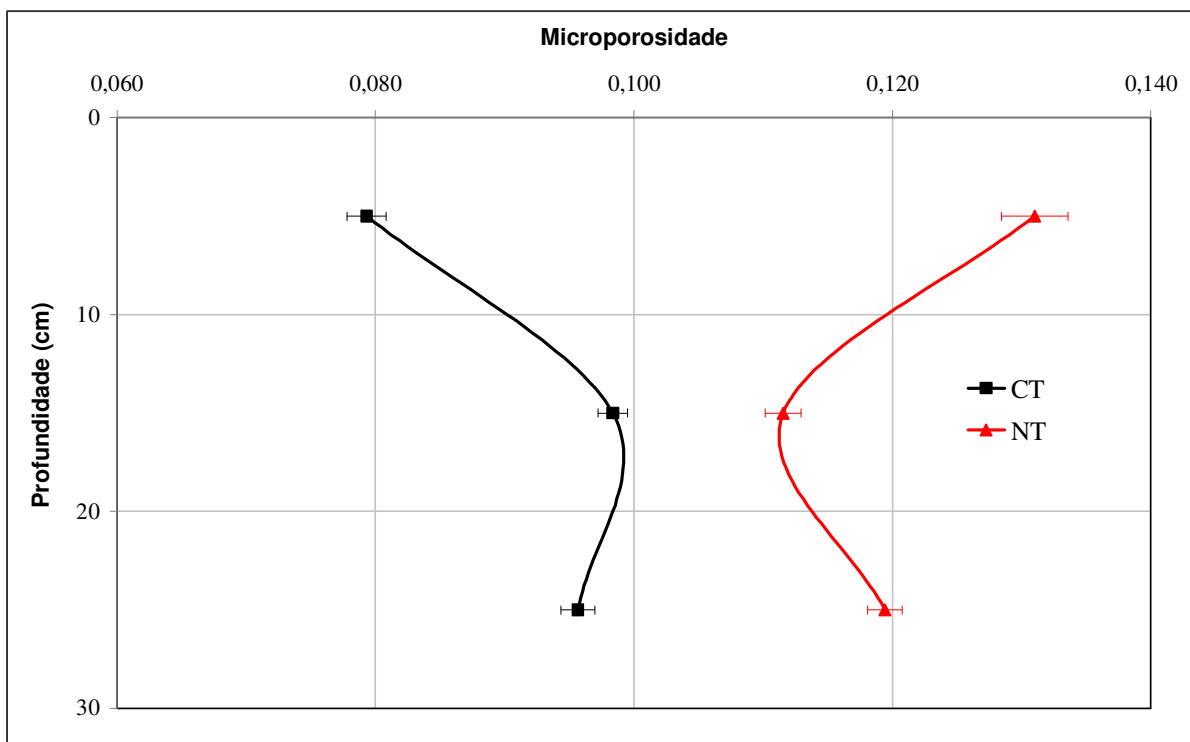


FIGURA 3.2.26: Microporosidade determinada pelo cálculo das CDPs para sistemas de plantio convencional (PC) e plantio direto (PD).

De forma geral, o gráfico da figura (3.2.26), mostra que em profundidade a microporosidade do solo para os dois sistemas de manejo apresentam comportamentos distintos.

Comparando os sistemas de manejo, verifica-se que na camada de 0-10 cm o sistema de plantio direto apresenta uma microporosidade em torno 66% maior que no sistema de plantio convencional. Para a camada de 10-20 cm as diferenças na microporosidade diminuem, sendo em torno de 12,5% maior para o sistema de plantio direto, enquanto que na camada de 20-30 o sistema de plantio direto apresenta uma porosidade 23% que o sistema de plantio convencional. Portanto, observa-se um aumento na macroporosidade.

Analisando a microporosidade em profundidade, verifica-se que a camada de 10-20 cm apresenta valores em torno de 24% maiores para sistema de plantio convencional em relação a camada de 0-10 cm e 15% menor para sistema de



plantio direto, valores estes que para o sistema de plantio convencional estão em concordância com os resultados da tabela (3.1.1) onde se espera que o aumento da densidade do solo promova diminuição na macroporosidade com concomitante aumento na microporosidade.

Na camada de 20-30 cm verifica-se que a microporosidade em torno de 21% maior que a camada de 0-10 cm para o sistema de plantio convencional e 9% menor nesta mesma camada para o sistema de plantio direto.

## CONCLUSÕES

As análises de densidade do solo indicaram compactação do solo abaixo da camada superficial, para ambos os sistemas de manejo. Esta compactação foi mais pronunciada no sistema de plantio convencional.

Os sistemas de manejo do solo promoveram modificações nas curvas de retenção em termos da saturação relativa (S). Para o sistema de plantio convencional, as curvas de retenção (S) conforme visto na figura (3.2.1) indicam menor homogeneidade estrutural, com destaque para a camada de 0-10 cm. No sistema de plantio direto, as curvas de retenção (S) figura (3.2.2) apresentaram maior uniformidade em todas as camadas investigadas.

O ajuste “spline cúbico” proporcionou maior detalhamento das CRs e, portanto, das curvas de distribuição de poros (CDP). Nos dois sistemas de plantio a estrutura das CDPs se mostrou do tipo tri-modal.

As CDPs para o sistema de plantio convencional (figura 3.2.9) apresentaram grande variabilidade em profundidade, indicando que, o revolvimento do solo promove a formação de camadas menos homogêneas.

Para o sistema de plantio direto (figura 3.2.10), as CDPs indicaram menor variabilidade das camadas em profundidade, reflexo provavelmente do menor revolvimento do solo.

O cálculo dos valores de macroporosidade e microporosidade obtidos através das áreas sob as CDPs (figuras 3.2.25 e 3.2.26) mostrou-se mais adequado para retratar mudanças nesses parâmetros, quando comparado aos métodos que utilizam informações da densidade. Entretanto, para ambos os métodos, os resultados indicam que os sistemas de manejo produzem compactação do solo abaixo de sua camada superficial.

## **SUGESTÃO DE TRABALHO FUTURO**

Para se obter informações mais precisas da estrutura do solo e suas alterações devido a sistemas de manejo, pode-se tentar a determinação da distribuição de poros usando-se métodos que empregam a análise de imagens. Isto serviria, por exemplo, para uma comparação com os resultados empregando a metodologia aqui apresentada.

## REFERÊNCIAS

AHUJA, L.R.; et al. Trans-Disciplinary Soil Physics Research Critical to Synthesis and Modeling of Agricultural Systems. **Soil Science Society American Journal**. 70:311–326, 2006.

ARAÚJO, M.A.; ET al. Propriedades Físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico Cultivado e sob Mata Nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 28: 337-345, 2004.

ARGENTON, J.; et al. Comportamento de Atributos Relacionados com a Forma da Estrutura de Latossolo Vermelho Sob Sistemas de Preparo e Plantas de Cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 29:425-435, 2005.

ARSHAD, M.A.; et al. Components of Surface Structure Under Conventional and No-Tillage in NorthWestern Canadá. **Soil & Tillage Research**. 53: 41-47,1999.

ASSOULINE, S. Modeling the Relationship Between Soil Bulk Density and the Water Retention Curve. **Vadoze Zone Journal**.5:554-563, 2006.

BESCANA, P.; et al. Soil Water Retention as Affected by Tillage and Residue Management in Semiariad Spain.**Soil & Tillage Research**. 87:19-27,2006.

BORTOLUZZI, E.C.; et al. Porosidade e retenção de água em um argissolo sob manejos convencional e direto submetido a compressões unidimensionais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 32: 1447-1457, 2008.

BOTTA, G.F.; et al, R. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annus L.*) yields. **Soil & Tillage Research**. 91: 164-172, 2006.

BOTTA, G.F.; et al. Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes. **Soil & Tillage Research**. 101:44-51, 2008.

CARVALHO, E.J.M.; et al. Comportamento Físico-Hídrico de um Podzólico Vermelho-Amarelo Câmbico Fase Terraço sob Diferentes Sistema de Manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 34: 257-265,1999.

CAVALIERI, et al. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil & Tillage Research**. 103:158–164, 2009.

D' HAENE, K.; et al. The effect of reduced tillage on nitrous oxide emissions of silt loam soils. **Biol Fertil Soils**. 45:213–217, 2008.

DAM, R.F.; et al. Soil Bulk Density and Crop Yield Under Eleven Consecutive Years of Corn with Different Tillage and Residue Practices in a Sandy Loam Soil in Central Canada. **Soil & Tillage Research**. 84: 41–53, 2005.

DARAMEGH, O.A.; et al. Soil structure stability under conventional and reduced tillage in a sandy loam. **Geoderma**. 150: 64–71, 2009.

DA VEIGA, M. Short and Long-Term Effects of Tillage Systems and Nutrient Sources on Soil Physical Properties of a Southern Brazilian Hapludox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 32:1437-1446, 2008.

<http://earth.google.com> (acessado em março de 2008).

<http://educar.sc.usp.br/ciencias/recursos.html>

EIJKELKAMP. **Operating Instructions**. Outubro 2007, 24p.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

FOLONI, J.S.S.; et al. Efeito da Compactação do Solo no Desenvolvimento Aéreo e Radicular de Cultivares de Milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 38, n. 8, p. 947-95, 2003.

GLAB, T.; KULIG, D. Effect of Mulch and Tillage System on Soil Porosity Under Wheat (*Triticum aestivum*). **Soil & Tillage Research**. 99:169–178,2008.

GOMÉZ, J.A.; et al. Effects of Tillage Method on Soil Physical Properties, Infiltration and Yield in an Olive Orchard. **Soil & Tillage Research**. 52:167-175,1999.

HAINES, W.B. Studies of Physical properties of Soils: The hysteresis effects in capillarity properties and modes of moisture distribution associated. **Journal Agricultural Science**. 20: 97-116,1930.

HUSSEIN, J.; ADEY, M.A. Changes in Microstructure, Voids and B-Fabric of Surface Samples of a Vertisol Caused by Wet/Dry Cycles. **Geoderma**. 85: 63–82, 1998.

IAPAR. Plantio Direto no estado do Paraná. **Circular Iapar**. Nº 23, Agosto/1981.

ISMAIL, I. Long-Term No-tillage Effects on Soil Properties and Continuous Corn Yields. **Soil Science Society American Journal**. 58:193-198,1994.

JORAJURIA, D.;DRAGHI, L.;ARAGON, A. The Effect of Vehicle Weight on the Distribution of Compaction with Depth and the Yield of Lolium/ Trijilium Grassland. **Soil & Tillage Research**. 41:1-12, 1997.

JURY, A. W.; GARDNER, W. R.; GARDNER, W. H. **Soil Physics**. Fifth Edition. New York, John Wiley & Sons, 1991, 328 p.

KASTANECK, F.J.; NIELSEN, D.R. Description of soil Water Characteristics Using Cubic Spline Interpolation. **Soil Science Society of American Journal**. 65: 279-283, 2001.

KEMPER, B.; VIEIRA, M.J. **Características Físicas de 5 Solos do Paraná, suas relações com a Erodibilidade e Possibilidades para o Melhoramento das Condições Físicas do Solo**. Congresso Brasileiro da Ciência do Solo, 1979, 94p.

KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soils. Madison: **American Society of Agronomy**. 253-261, 1986.

KOSUGI, K.; HOPMANS, J.W. Scaling Water Retention Curves for Soils with Lognormal Pore-Size Distribution. **Soil Science Society American Journal**. 62:1496-1505, 1998.

KUSHWAHA, C.P.; TRIPATHI, S.P.; SINGH, K.P. Soil Organic Matter and Water-Stable Aggregates Under Different Tillage and Residue Conditions in a Tropical Dryland Agroecosystem. **Applied Soil Ecology**. 16: 229–241, 2001.

KUTÍLEK, M. Soil Hydraulic Properties as Related to Soil Structure. **Soil&Tillage Research**. 79: 175-184, 2004.

KUTÍLEK, M.; et al. The Influence of Uniaxial Compression Upon Pore Size Distribution in Bi-modal Soils. **Soil & Tillage Research**. 86: 27-37,2006.

LACHNIGHT, S.L.; et al. Characteristics of Macroporosity in a Reduced Tillage Agroecosystem with Manipulated Earthworm Populations: Implications for Infiltration and Nutrient Transport. **Soil Biodiversity Biochemical**. 29: 314, 493-498,1997.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da Água no Solo**. 1<sup>o</sup> Ed Editora da Universidade de São Paulo Edusp – SP: O autor, 1995, 497 p.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da Água no Solo**. 2<sup>a</sup>. Ed, Piracicaba – SP: O autor, 2000, 509p.

LIPIEC, J.; et al. Soil Porosity and Water Infiltration as Influenced by Tillage Methods. **Soil& Tillage Research**. 89: 210-220, 2006.

LOGSDON, S.D.; CAMBARDELLA, C.A. Temporal Changes in Small Depth-Incremental Soil Bulk Density. **Soil Science Society American Journal**. 64:710–714 (2000).

Mapa de solos do Estado do Paraná: Leganda atualizada/ editores, Silvio Barge Bhering, Humberto Gonçalves dos Santos. - Rio de Janeiro: **Embrapa Florestas: Embrapa Solos: Instituto Agrônômico do Paraná**. 2008. 74p.

MARTÍNEZ, E.; et al. Soil Physical Properties and Wheat Root Growth as Affected by No-Tillage and Conventional Tillage Systems in a Mediterranean Environment of Chile. **Soil & Tillage Research**. 99:232–244, 2008.

McGARRY, D.; BRIDGE,B.J.; RADFORD,B.J. Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in the semi-arid subtropics. **Soil & Tillage Research**. 53: 105-115, 2000.

MIYASAKA. S; MEDINA, J.C. **A Soja no Brasil**, 1<sup>o</sup> Edição, 1981,1062p.

MORET, D.; et al. Dynamics of Soil Hydraulic Properties During Fallow as Affected by Tillage. **Soil & Tillage Research**. 96:103–113, 2007.

OLIVEIRA, J.T et al. Características Físicas e Carbono Orgânico de solos sob Diferentes tipos de uso da Terra. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 32:2821-2829, 2008.

PAGLIAI, M.; et al. The Structure of two Alluvials Soils in Italy After 10 Years of Conventional and Minimum Tillage. **Soil & Tillage Research**. 34:209-226, 1995

PAGLIAI, M.; et al. Changes in some Physical Properties of a Clay Soil in Central Italy following the Passage of Rubber Tracked and Wheeled Tractors of Medium Power. **Soil & Tillage Research**. 73:119-129, 2003.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil Structure and the Effect of Management Practices. **Soil & Tillage Research**. 79: 131-143, 2004.

PIRES, L.F, et al. Micromorphological Analysis to Characterize Structure Modifications of Soil Samples Submitted to Wetting and Drying Cycles. **Catena**. 72: 297–304, 2008.

RASMUSSEN, K.J. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality:A Scandinavian review. **Soil & Tillage Research**. 53:3-14, 1999.

REICHARDT, K. **Dinâmica da Matéria e da Energia em Ecossistemas**. Piracicada-SP: Editora USP/ESALQ, 1996, 505p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos, Processos e Aplicações**. São Paulo: Editora Manole, 2004, 478p.

RICHARD, G.; et al. Effect of compaction on the porosity of a silty soil:influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal of Soil Science**. 52:49-58, 2001.

RICHARDS, L. A.; FIREMAN, M. Pressure plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. **Soil Science**. v.56, p.395-404, 1943



RILEY, H.; et al. Soil structure, organic matter and earthworm activity in a comparison of cropping systems with contrasting tillage, rotations, fertilizer levels and manure use. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. 124: 275–284, 2008.

ROUSSEVA, S.; TORRI, D.; PAGLIAI, M. Effect of Rain on the Macroporosity at the Soil Surface. **European Journal of Soil Science**. 53: 83-94, 2002.

SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M. Atributos Físicos de dois Latossolos Afetados pela Compactação do Solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. 10: 842-847, 2006a.

SILVA, R.B.; et al. Estimation and Evaluation of Dynamic Properties as Indicators of Changes on Soil Structure in Sugarcane Fields of Sao Paulo State – Brazil. **Soil & Tillage Research**. 103: 265-270, 2009b.

TEBRUGGI, F.; DURING, R.A. Reduced tillage intensity-a review of results from a long-term study in Germany. **Soil & Tillage Research**. 53:15-28, 1999.

TORMENA, C.A. et al. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)**. Piracicaba, v. 59, n. 4, 2002.

TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999. 410 p.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A Closed – Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of América Journal**. 44:892 – 898, 1980.

WINTER, E.J. **A Água, o Solo e a Planta**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1976, 170p.

## ANEXO A - FUNÇÃO CAPACIDADE DE ÁGUA

Em JURY et al. (1991), a relação  $d\theta/d\Psi_m$  é definida como “Função Capacidade de Água”, a qual expressa a variação da umidade ( $\theta$ ) em relação à variação de potencial matricial ( $\Psi_m$ ).

A Figura (A.1) representa uma curva de retenção de um dado solo e a Figura (A.2), a curva diferencial dela oriunda.

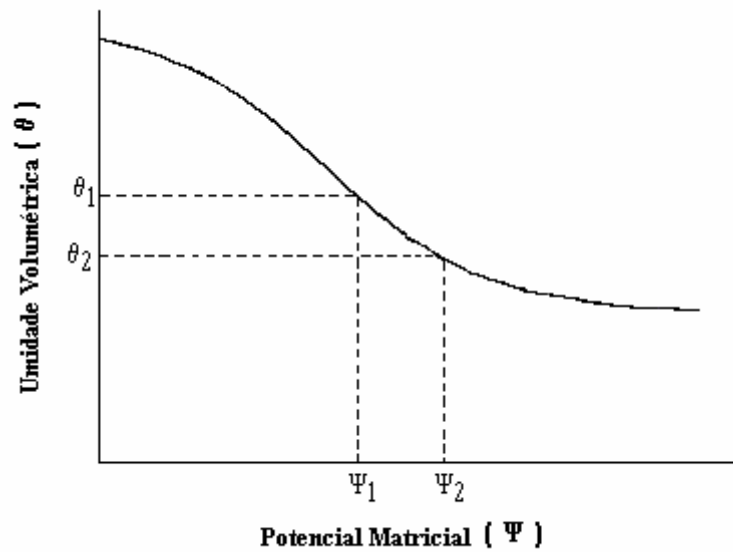


FIGURA A.1: Curva de retenção de um solo.  
(LIBARDI, 2000)

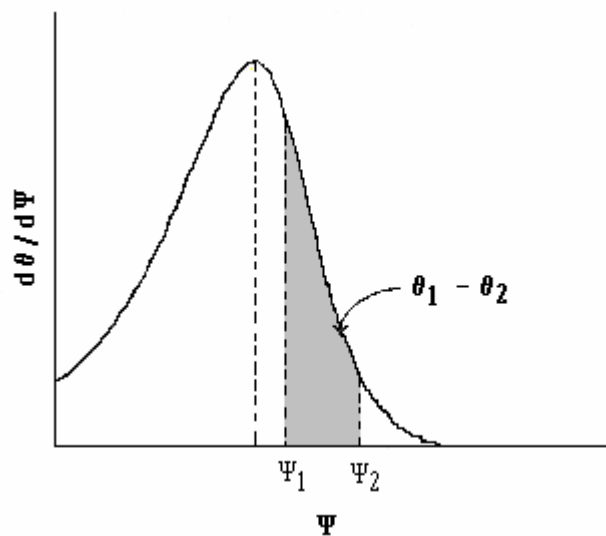


FIGURA A.2: Curva diferencial da curva de retenção do solo da figura (A.1).  
(LIBARDI, 2000)

Para se entender o significado da curva diferencial, imaginemos que o esvaziamento de poros de raio maior do que  $r_1$  ocorre quando se aplica uma sucção equivalente à  $\Psi_1$ . E que pela aplicação de uma sucção maior  $\Psi_2$  sejam esvaziados poros de raios maiores do que  $r_2$ . Quando se analisa o efeito da variação de sucção  $\Delta\Psi = \Psi_2 - \Psi_1$ , pode-se imaginar que os poros entre  $r_2$  e  $r_1$  ( $r_1 > r_2$ ) foram esvaziados. Com isso, o volume de água extraído do solo com a variação da tensão de  $\Psi_1$  para  $\Psi_2$ , o qual é obtido pela diferença de umidades  $\theta_2 - \theta_1$ , é igual ao volume de poros de raio menor do que  $r_1$  e maior do que  $r_2$  esvaziados na amostra.

Com base nestas considerações, percebe-se que, para uma mesma variação de  $\Psi_2 - \Psi_1$ , quanto maior for  $\theta_1 - \theta_2$ , maior é o número de poros existentes no solo com raios entre  $r_1$  e  $r_2$ , ou seja, pode-se obter, a partir da curva de retenção, a distribuição do tamanho de poros da estrutura (LIBARDI, 2000).